

UNIVERSITAT JAUME I

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS
MÀSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**



***Optimización del mezclado y la homogeneización
en reactores anóxicos de EDAR mediante
agitadores sumergibles***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR

Enric Barreda Fabregat

DIRECTOR

Sergio Chiva Vicent

Castellón, Julio de 2017

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA:

1. Objetivo	9
2. Alcance	11
3. Introducción	13
3.1. El proceso de tratamiento de aguas residuales	13
3.1.1. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales	13
3.1.2. Pasos posteriores al tratamiento	17
3.2. Consumo energético en el tratamiento de aguas residuales.....	19
3.3. Agitadores	22
3.3.1. Agitadores sumergibles	23
4. Fundamentos teóricos.....	27
4.1. Perfil de velocidades	27
4.2. Arrastre	29
4.3. Ángulo de expansión	30
4.4. Efecto coanda.....	31
4.5. Empuje	32
4.6. Parámetros adimensionales.....	35
4.7. Eficiencia	37
4.8. Velocidad para evitar sedimentaciones	37
4.9. Disposición típica de los agitadores	38
5. Consideraciones previas.....	41
5.1. Método de cálculo.....	41
5.2. Programa de cálculo.....	42
5.3. Simulaciones.....	42
5.3.1. Mallado del sistema	42
5.3.2. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos.....	44
5.3.3. Geometría de las simulaciones	46
5.3.4. Parámetros del agitador en cada simulación.....	52
6. Resultados	55
6.1. Análisis del flujo	55
6.1.1. Estructura del flujo	55
6.1.2. Análisis de velocidades.....	59

6.1.3. Efecto del diámetro y de la velocidad del agitador.....	63
6.1.4. Caudal volumétrico y arrastre.....	65
6.1.5. Ángulo de expansión	67
6.1.6. Análisis del comportamiento del flujo en el agitador	68
6.1.7. Análisis del efecto de la profundidad en la instalación del agitador	71
6.2. Análisis del agitador	72
6.2.1. Empuje o <i>thrust</i>	72
6.2.2. Parámetros adimensionales.....	74
6.2.3. Eficiencia	75
6.3. Simplificación de la geometría del agitador para facilitar el cálculo	77
6.4. Optimización del posicionamiento de agitadores sumergibles	80
6.4.1. Tanque rectangular	81
6.4.2 Tanque de recirculación con aireación	84
6.4.3. Tanque anular	87
7. Estudio de viabilidad económica.....	91
8. Conclusiones.....	95
9. Bibliografía	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del proceso de tratamiento de aguas residuales (Miliarium)	13
Figura 2: Esquema de funcionamiento de un clarificador/decantador	15
Figura 3: Tratamiento secundario (Wikipedia).....	15
Figura 4: Esquema gráfico del proceso de depuración de aguas residuales.....	17
Figura 5: Tratamiento de fangos (Miliarium)	19
Figura 6: Potencia requerida por unidad de tratamiento (IDAE, 2010)	20
Figura 7: Consumos energéticos según tratamiento (M.G. González González)	20
Figura 8: Diagrama del balance energético de una EDAR (Castell, y otros, 2011).....	21
Figura 9: Agitador vertical	22
Figura 10: Agitador sumergible de baja velocidad	24
Figura 11: Agitador sumergible de media velocidad	25
Figura 12: Agitador sumergible de baja velocidad	26
Figura 13: Estructura del flujo generado por un agitador sumergible.....	27
Figura 14: Vena contracta (Uby, 2001).....	28
Figura 15: Perfiles de velocidades (u , w y v respectivamente (Per Petersson, Development of a turbulent jet generated by a mixer in weak co-flow and counter-flow, 2000).....	29
Figura 16: Arrastre (Per Petersson, Development of a turbulent jet generated by a mixer in weak co-flow and counter-flow, 2000)	30
Figura 17: Ángulo de expansión (Per Petersson, Development of a turbulent jet generated by a mixer in weak co-flow and counter-flow, 2000)	31
Figura 18: Flujo circulando libremente (S & C Thermofluids Ltd)	32
Figura 19: Flujo atraído por una superficie cercana (S & C Thermofluids Ltd)	32
Figura 20: Medición experimental del empuje de un agitador (ISO 21630:2007).....	34
Figura 21: Cálculo analítico del empuje (Wilo, 2013).....	34
Figura 22: Ensayo para medir el empuje (Pumps).....	35
Figura 23: Ratio empuje-potencia de distintos tipos de agitadores (Wilo, 2013)	37
Figura 24: Tanque rectangular	39
Figura 25: Tanque de recirculación con aireación.....	39
Figura 26: Tanque anular con aireación	40

Figura 27: Nodos en los vértices y en los centros respectivamente (Osses)	42
Figura 28: Volumen rotativo para las simulaciones	43
Figura 29: Mallado del volumen rotativo	44
Figura 30: Mallado del sistema.....	44
Figura 31: Geometría de la simulación.....	47
Figura 32: Condición de no deslizamiento	48
Figura 33: Condiciones de contorno.....	48
Figura 34: Geometría para el ensayo del empuje	49
Figura 35: Geometría del tanque rectangular	50
Figura 36: Geometría del tanque de recirculación.....	51
Figura 37: Geometría del tanque anular	51
Figura 38: Agitador sumergible Amaprop	52
Figura 39: Estructura del flujo	55
Figura 40: Fluido succionado por el agitador	56
Figura 41: Fluido empujado por el agitador	56
Figura 42: Vista lateral de la distribución de vectores de velocidad	57
Figura 43: Vista superior del flujo.....	57
Figura 44: Vista superior del flujo en la zona del agitador	58
Figura 45: Distribución de la velocidad axial	59
Figura 46: Velocidad axial en función de la distancia.....	60
Figura 47: Velocidad axial en función de la distancia.....	61
Figura 48: Velocidad vertical en función de la distancia	61
Figura 49: Velocidad axial en todo el recorrido del flujo	62
Figura 50: Comparación de la velocidad del flujo para distintas velocidad de giro (2500mm)	63
Figura 51: Comparación de la velocidad del flujo para distintos diámetros (34rpm)....	64
Figura 52: Caudal arrastrado	65
Figura 53: Representación visual del arrastre	66
Figura 54: Conservación de la cantidad de movimiento	66
Figura 55: Cálculo del ángulo de expansión	67
Figura 56: Zona de succión y empuje del agitador	68
Figura 57: Distribución de vectores de velocidad	69

Figura 58: Velocidad a la entrada y salida del agitador.....	69
Figura 59: Velocidad y presiones en el agitador.....	70
Figura 60: Distribución de velocidades a media profundidad.....	71
Figura 61: Distribución de velocidad a gran profundidad	71
Figura 62: Simulación del ensayo para calcular el empuje	73
Figura 63: Evolución del empuje con el diámetro del agitador	73
Figura 64: Evolución del empuje con la velocidad de giro del agitador.....	74
Figura 65: Evolución de la eficiencia con la velocidad de giro	76
Figura 66: Velocidad a la salida del agitador	77
Figura 67: Velocidad a la salida del cilindro	79
Figura 68: Comparación perfil de velocidades de un agitador y su simplificación	80
Figura 69: Distribución de velocidades en piscina rectangular	81
Figura 70: Velocidad en el fondo con un agitador en la esquina de 6,41kW.....	82
Figura 71: Velocidad en el fondo con un agitador centrado de 6,41kW	82
Figura 72: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW.....	83
Figura 73: Distribución de velocidades en piscina rectangular de recirculación	84
Figura 74: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 6,41kW.....	84
Figura 75: Velocidad en el fondo del tanque con un agitador de 6,41kW.....	85
Figura 76: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW.....	85
Figura 77: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW.....	86
Figura 78: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW.....	86
Figura 79: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 6,41kW.....	87
Figura 80: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW.....	88
Figura 81: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW.....	89
Figura 82: Distribución de velocidades en piscina anular	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación agitador sumergible y agitador vertical	23
Tabla 2: Características del agua en el ensayo de un agitador según la norma ISO 21630 (ISO 21630:2007)	33
Tabla 3: Velocidad de sedimentación de partículas	38
Tabla 4: Resumen simulación canal abierto	48
Tabla 5: Resumen simulación del ensayo para medir el empuje	49
Tabla 6: Resumen simulación tanque rectangular	50
Tabla 7: Resumen simulación tanque de recirculación	51
Tabla 8: Resumen simulación tanque de recirculación	52
Tabla 9: Parámetros de las simulaciones	53
Tabla 10: Propiedades del agua en las simulaciones	53
Tabla 11: Empuje para distintos tamaños y velocidades de giro	72
Tabla 12: Número de empuje y número de flujo	74
Tabla 13: Cálculo del parámetro c y el swril numer	75
Tabla 14: Valores de la eficiencia	76
Tabla 15: Comparación de elementos de la malla	80
Tabla 16: Resumen optimización tanque rectangular	83
Tabla 17: Resumen optimización tanque de recirculación	87
Tabla 18: Resumen optimización tanque anular	90

1. Objetivo

Dentro del ciclo integral del agua, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) suponen la mayor parte del consumo energético. Por este motivo, buscar mejoras en la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo dentro de una EDAR es importante para mejorar el desempeño energético de todo el ciclo de gestión del agua.

Dentro de los distintos procesos que se realizan en una EDAR, el tratamiento biológico es el que consume claramente una mayor cantidad de energía debido a la gran cantidad de electricidad que consume todo el sistema de aireación necesario para inyectar oxígeno en los tanques.

Es por eso que muchos de los esfuerzos para mejorar la eficiencia energética van encaminados a optimizar todo este sistema de aireación. Sin embargo, existen otros elementos donde también se puede conseguir una reducción en el consumo energético.

Uno de esos elementos es el sistema de agitación que se utiliza en distintas partes de una EDAR, principalmente en los tanques de aireación en los que se realiza el tratamiento biológico y en el reactor anóxico en el que se realiza el tratamiento de los fangos.

Existen distintos tipos de agitadores que realizan esta función de agitación. Sin embargo, los que presentan un mejor rendimiento energético son los agitadores sumergibles de baja velocidad.

El objetivo del presente trabajo es estudiar en detalle el comportamiento de este tipo de agitadores sumergibles, analizando cómo influyen sobre su desempeño distintas variables de funcionamiento, para posteriormente poder encontrar la disposición más óptima para las aplicaciones en las que se utilizan agitadores sumergibles dentro de una EDAR.

A través del análisis, se determinará la relación entre estas variables y la fuerza de empuje, siendo ésta la característica más representativa del comportamiento de un agitador sumergible. También se desarrollará un conjunto de ecuaciones que permita replicar el comportamiento del agitador, lo que simplificará en gran medida los cálculos y facilitará el proceso de optimización.

2. Alcance

Dentro de un mismo modelo de agitadores, las características que diferencian su funcionamiento son dos: el diámetro y la velocidad de giro.

Estas son las dos variables que se van a estudiar para entender cómo afectan al funcionamiento, de manera que podrían considerarse como las variables de entrada.

La variable de salida que se va a calcular es la fuerza de empuje del agitador que es la característica más significativa de cualquier agitador sumergible, ya que representa la fuerza que el agitador realiza sobre el flujo y que se traduce en un incremento de su momento lineal y, por tanto, de su velocidad.

A partir de conocer el empuje del agitador también se calculará su eficiencia, en forma de ratio empuje-potencia. De esta forma se determinará como afectan las variables de entrada a la eficiencia del agitador.

Aparte de estas variables de funcionamiento del agitador, también se analizará el comportamiento del flujo generado. En este sentido se estudiarán conceptos fundamentales para entender cómo se desarrolla el flujo, como pueden ser el perfil de velocidades, el arrastre y el ángulo de expansión.

El alcance de este trabajo incluye también el desarrollo de una ecuación que permita representar el comportamiento de un agitador sumergible de baja velocidad, de forma que a partir de esta ecuación se pueda reemplazar la geometría compleja de un agitador por una geometría simple que aporte al flujo el mismo empuje que el agitador mediante la ecuación anteriormente obtenida.

Con la mayor velocidad de cálculo que se consigue al sustituir el agitador por una geometría simple en las simulaciones, se estudiarán distintas opciones de posicionamiento con el objetivo de optimizar el proceso de agitación en aquellas aplicaciones en las que se utilizan agitadores dentro de una EDAR.

Por último, en este trabajo se incluirá también un estudio del ahorro energético que se consigue con los agitadores sumergibles de baja velocidad con respecto a otros tipos de agitadores y se determinará la rentabilidad de la inversión en caso de instalarse en alguna de las aplicaciones estudiadas.

3. Introducción

3.1. El proceso de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales incluye todos los procesos que se llevan a cabo para eliminar los contaminantes del agua procedente del uso humano para conseguir que ésta pueda reutilizarse posteriormente. Estos procesos son de distintos tipos: procesos físicos, procesos biológicos y procesos químicos.

Las aguas residuales se generan en viviendas y en todo tipo de construcciones comerciales o industriales. En los países desarrollados, estas aguas, mediante el sistema de alcantarillado, son dirigidas hacia una EDAR donde se someten a diferentes procesos para eliminar los contaminantes. Con el proceso de depuración se consigue transformar el agua residual que está inicialmente contaminada en los productos resultantes del proceso, que son agua limpia que puede ser reutilizada y el fango o residuos sólidos que se generan.

A continuación se van a detallar las distintas etapas que forman el proceso de tratamiento de aguas residuales.

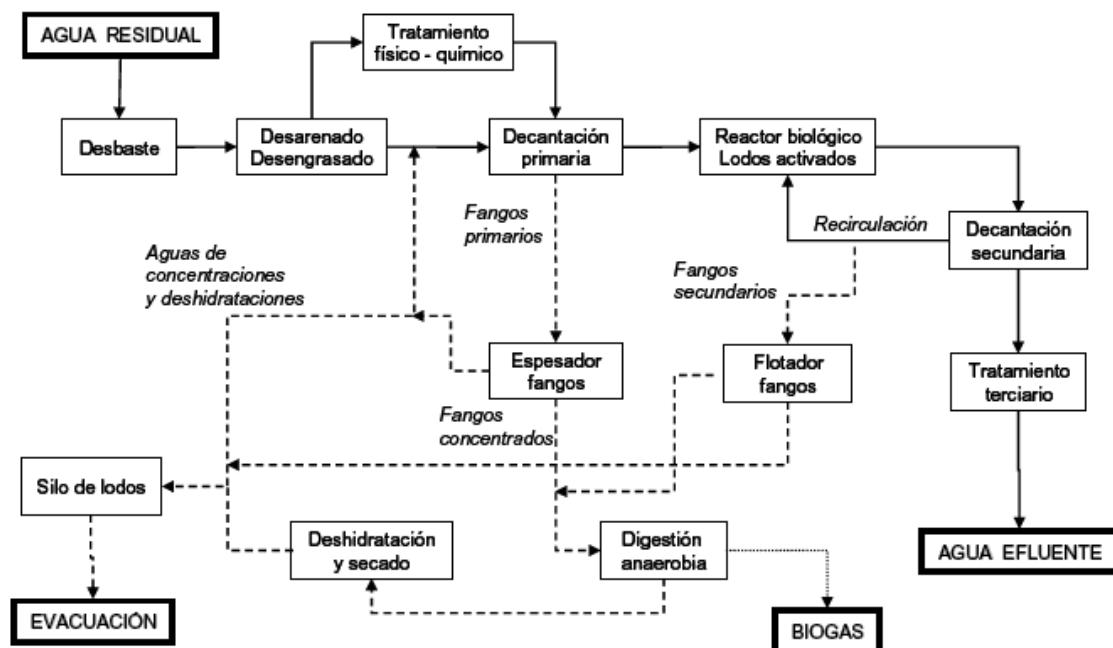


Figura 1: Esquema del proceso de tratamiento de aguas residuales (1)

3.1.1. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales

Podemos decir que los distintos procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento de aguas residuales se agrupan en cuatro etapas bien diferenciadas:

Tratamiento preliminar

Las estaciones depuradoras de aguas residuales normalmente trabajan con un caudal constante. Por este motivo, es necesario que exista una regulación del caudal que entra en las distintas etapas del proceso. Esta regulación del caudal se realiza en la etapa preliminar.

A lo largo del día, la generación de aguas residuales no es constante. Durante el día la producción es mayor que por las noches, por lo tanto, durante el día será necesario almacenar una parte del caudal de agua residual que llega a la EDAR para que este entre en el proceso durante la noche, de forma que el caudal con el que se trabaja en la depuradora sea constante a lo largo de todo el día.

Aparte de realizar la función de regular el caudal, otra función que se realiza en esta etapa preliminar es la eliminación de los sólidos de mayor tamaño. También se elimina arena y en algunos casos grasas. Para realizar estas funciones, se utilizan tamices desarenadores y desgrasadores.

Tratamiento primario

En la etapa preliminar se consigue eliminar los sólidos de mayor tamaño. En la etapa de tratamiento primario se eliminan los sólidos suspendidos que no han podido ser eliminados en la etapa anterior.

Para ello, se utiliza un proceso de sedimentación por gravedad y en algunas ocasiones se agregan determinados compuestos químicos para conseguir que precipiten sólidos muy finos o algunas sustancias como el fósforo.

Este proceso de sedimentación por gravedad se lleva a cabo en los clarificadores primarios o estanques de sedimentación primarios. El funcionamiento de este proceso es sencillo y se basa en determinar el tiempo que tiene que estar el fluido en los tanques en función de la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas que se desean eliminar. Por lo general, el tiempo que el agua residual pasa en estos tanques oscila entre 60 y 120 minutos, consiguiéndose eliminar alrededor del 70% de las partículas sólidas en suspensión.

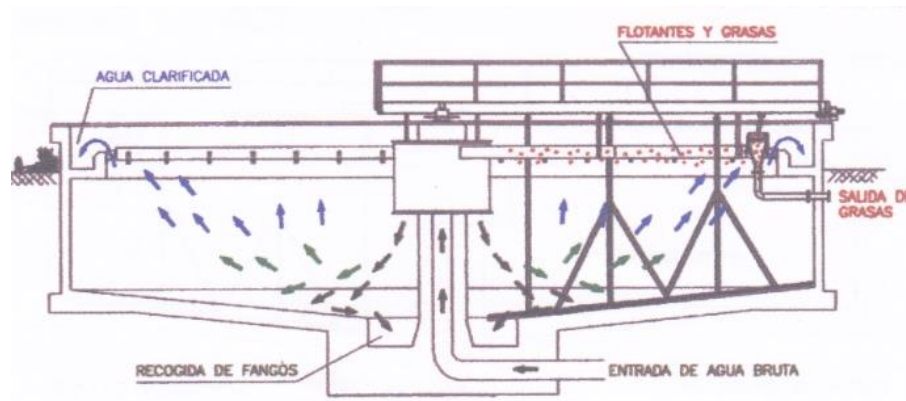


Figura 2: Esquema de funcionamiento de un clarificador/decantador

Tratamiento secundario

Así como en las etapas anteriores se eliminaban las partículas sólidas mediante procesos físicos, en esta etapa del proceso se elimina la materia orgánica que está disuelta en el fluido mediante la combinación de un proceso biológico con otro físico de sedimentación.

En la siguiente figura se muestran estos dos procesos que conforman la etapa de tratamiento secundario:

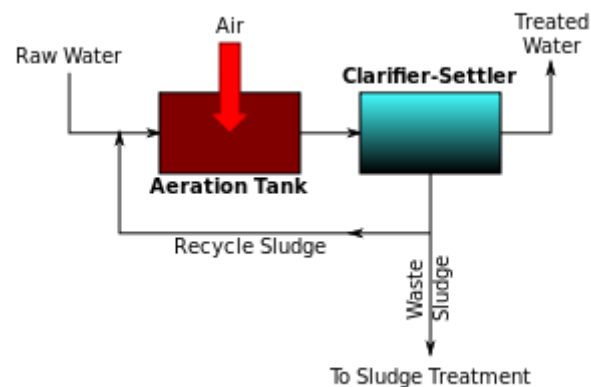


Figura 3: Tratamiento secundario (2)

Este proceso biológico se lleva a cabo en reactores de aireación. Se trata de un tratamiento aerobio basado en un proceso de oxidación biológica. Éste proceso consiste en la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual llevada a cabo por microorganismos que se alimentan de la materia orgánica que la contamina, necesitando de la presencia de oxígeno. Es uno de los procesos, dentro de

una EDAR, en los que se utilizan agitadores para conseguir una buena agitación del fluido que garantice una buena aireación y que el proceso biológico se desarrolle de forma homogénea.

Mediante esta degradación de la materia orgánica se consigue formar una especie de biomasa o fango que queda suspendido en el agua. Por este motivo, este proceso recibe también el nombre de fango activo.

Éste fango que se ha formado en el proceso biológico se separa a continuación del agua mediante un proceso de sedimentación.

El proceso de sedimentación se lleva a cabo en el decantador secundario, también llamado clarificador secundario.

Tratamiento terciario

Con las etapas anteriores del proceso se consigue eliminar tanto las sustancias sólidas como la materia orgánica y bacterias disueltas en el agua residual.

El objetivo de esta última etapa del proceso de depuración es eliminar ciertos contaminantes que no se han podido eliminar en las etapas anteriores. La etapa de tratamiento terciario es una etapa que no está presente en todas las EDAR, ya que la necesidad de su presencia depende de que la composición del agua residual que llega a la depuradora tenga componentes que no puedan eliminarse mediante los procesos anteriores y depende también de cuál sea la utilidad que se le vaya a dar al agua una vez tratada.

Mediante esta etapa se consiguen eliminar sustancias como los fosfatos, los cuales no se conseguirían eliminar con las etapas de tratamiento primario y secundario explicadas anteriormente.

En la siguiente imagen se muestra una representación gráfica de las distintas etapas que acaban de ser explicadas:

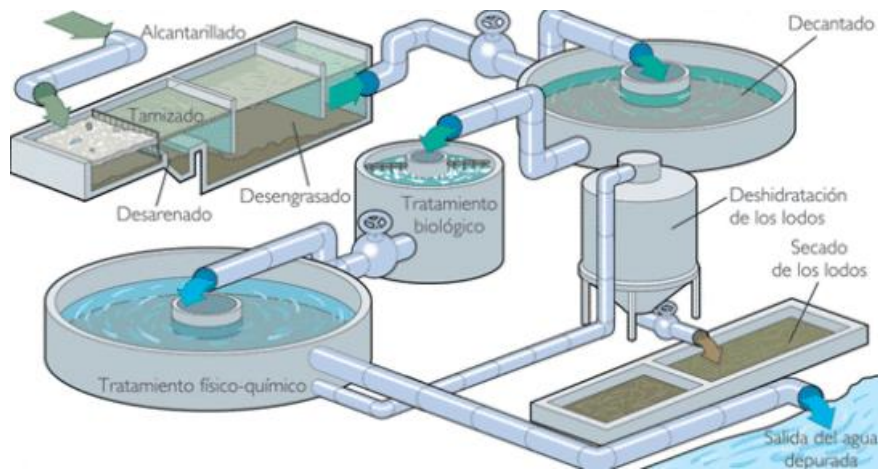


Figura 4: Esquema gráfico del proceso de depuración de aguas residuales

3.1.2. Pasos posteriores al tratamiento

Mediante las cuatro etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales explicadas anteriormente se obtiene, de una parte, agua tratada y, de otra, fango generado en el proceso.

El proceso de depuración no termina aquí, sino que se realiza un tratamiento posterior tanto sobre el agua como sobre los fangos.

Tratamiento del agua

La actuación que se realiza sobre el agua depurada es un tratamiento de desinfección.

El agua resultante de las etapas anteriores del proceso de tratamiento de aguas residuales suele contener ciertos microorganismos patógenos que no han podido ser eliminados.

La desinfección de estos microorganismos es importante, especialmente si el agua va a ser utilizada para fines recreativos, para aplicaciones en las que pueda estar en contacto con alimentos o cuando directamente pueda ser utilizada en fuentes para consumo de personas.

Existen distintas técnicas para la desinfección del agua como pueden ser la cloración, la ionización o la radiación ultravioleta. Sin embargo, de todas ellas la más utilizada es la cloración, ya que es un proceso muy eficaz y que tiene un coste reducido, a pesar de que posteriormente hay que aplicar un proceso de dechloración para que el agua sea utilizable.

Tratamiento de fangos

Como hemos visto anteriormente, los fangos que se genera en el proceso de tratamiento de aguas residuales provienen de la sedimentación que se realiza en el clarificador primario y secundario.

Este fango está compuesto principalmente de agua que contiene disueltas tanto sustancias orgánicas como partículas sólidas, además de microorganismos utilizados en el proceso biológico de la etapa de tratamiento secundario.

Existen distintas técnicas para el tratamiento de los fangos, como pueden ser el acondicionamiento químico, la deshidratación de fangos o la digestión tanto anaerobia como aerobia.

A continuación se explicará el funcionamiento de estas dos últimas, ya que son las más usuales y además utilizan agitadores sumergibles para agitar el fluido.

Tanto la digestión anaerobia como la digestión aerobia se realizan por bacterias que degradan la materia orgánica. Sin embargo, la diferencia principal entre ambas reside en el hecho de que en la digestión anaerobia las bacterias no requieren de oxígeno, por lo que el proceso se lleva a cabo en tanques cerrados, mientras que en la digestión aerobia las bacterias sí que necesitan de oxígeno, por lo que el proceso se lleva a cabo en tanques abiertos a los que se inyecta oxígeno en el fluido.

Otra diferencia reside en el hecho de que la digestión aerobia se realiza a temperatura ambiente, mientras que la digestión anaerobia requiere de temperaturas superiores, siendo la temperatura óptima de unos 35 °C.

El producto de la digestión anaerobia es metano y dióxido de carbono, mientras que el producto de la digestión aerobia es dióxido de carbono y agua.

La cantidad de metano que se forma en el proceso de digestión anaerobia es importante. Por ese motivo, en muchas EDAR ese metano se recupera y se utiliza como fuente de energía para abastecer a la propia depuradora.

El fango que se obtiene después del proceso de tratamiento puede ser utilizado en agricultura como fertilizante orgánico si no contiene sustancias tóxicas. En caso de no poder ser utilizado de esta forma, se elimina una mayor cantidad de agua y se envía a plantas de incineración o vertederos.

En la siguiente imagen se puede observar un esquema del proceso completo de tratamiento de fangos:

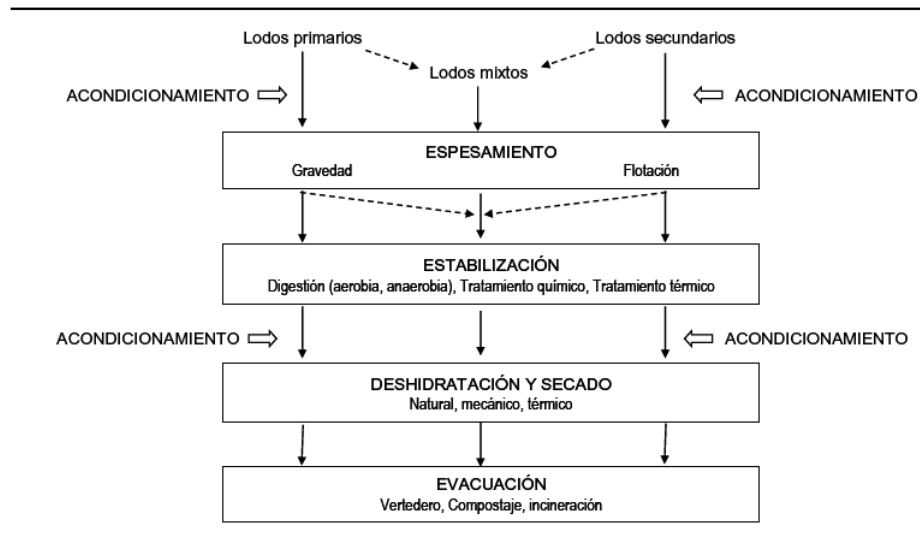


Figura 5: Tratamiento de fangos (1)

3.2. Consumo energético en el tratamiento de aguas residuales

Dentro de todo el ciclo integral del agua, las estaciones depuradoras de aguas residuales suponen en torno al 65% del consumo energético total (3). Por este motivo, las acciones para conseguir un ahorro energético en todo el proceso de gestión del ciclo del agua deben ir encaminadas a mejorar el rendimiento energético de las EDAR.

Dentro de una EDAR, el consumo energético supone entre un 15 y un 30% del gasto total de explotación (4), siendo éste el mayor gasto que se da en la planta.

El consumo energético en una EDAR depende de varios factores, como pueden ser los equipos y tecnología utilizadas, o el nivel de tratamiento que se le da al agua, aunque el más determinante es el tamaño de la población al que la EDAR da servicio.

La forma más habitual de medir el consumo energético de una EDAR, con el fin de poder comparar unas depuradoras con otras, es midiendo el consumo en términos de kWh/m³ o en W/he.

Según el informe del IDAE sobre el consumo energético en el sector del agua, la potencia instalada actualmente en las depuradoras de aguas residuales en España es de 305 MW. Esto supone un consumo eléctrico medio de 0,67 kWh/ m³ (5).

En la siguiente figura se muestra el consumo energético medio de las EDAR en España en función del tamaño de la población al que sirven. El consumo está fraccionado entre las distintas unidades de tratamiento que hay en una estación depuradora de aguas residuales.

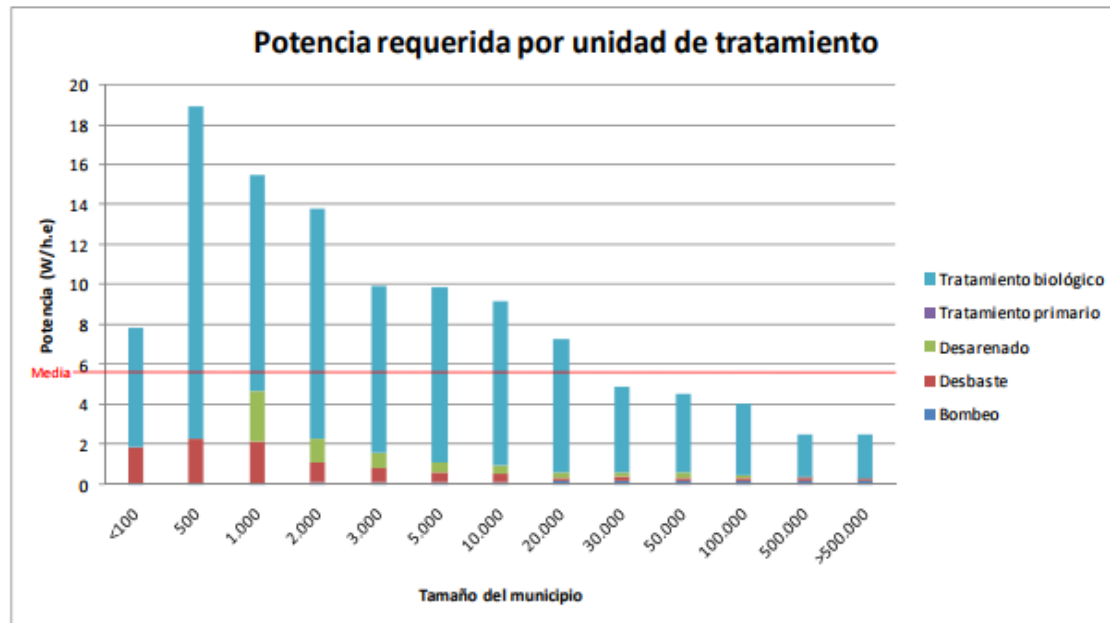


Figura 6: Potencia requerida por unidad de tratamiento (5)

Se puede observar en la figura anterior cómo a medida que aumenta el tamaño del municipio el consumo energético por habitante se reduce. El hecho de que las estaciones depuradoras en municipios de menos de 100 habitantes no siga la tendencia del resto se debe a que en muchos casos estas depuradoras tan pequeñas no realizan la etapa de tratamiento biológico que es la etapa más intensiva en lo que se refiere al consumo energético.

Como se puede observar, la etapa de tratamiento secundario es la que representa un mayor consumo eléctrico dentro de una EDAR. En concreto, esta etapa del proceso de depuración de aguas residuales puede llegar a suponer más del 70% del consumo eléctrico total que se da en la planta.

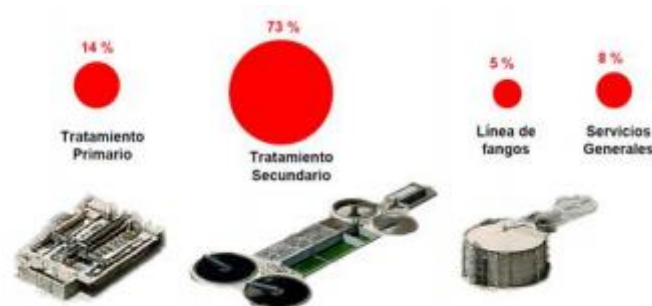


Figura 7: Consumos energéticos según tratamiento (6)

Esta gran cantidad de energía consumida en la etapa de tratamiento secundario proviene principalmente de los equipos destinados a suministrar oxígeno a los

reactores biológicos.

Estos equipos de aireación suponen más del 50% del consumo de energía en el tratamiento secundario, lo que representa alrededor del 40% del consumo energético total de la planta.

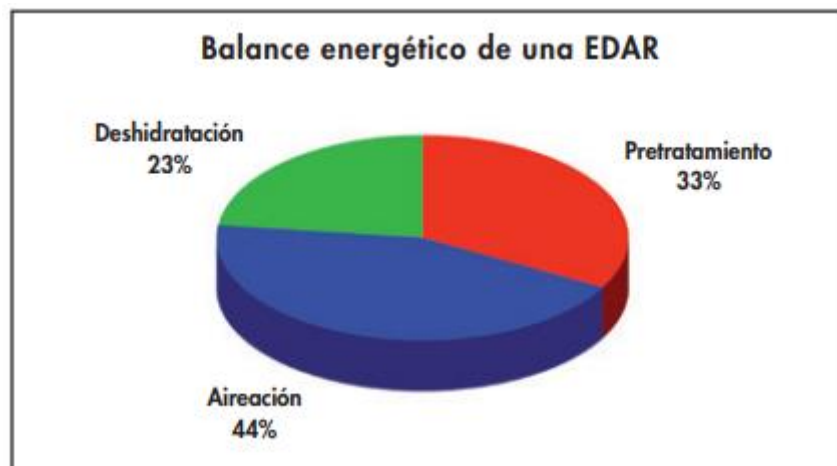


Figura 8: Diagrama del balance energético de una EDAR (4)

Debido al enorme peso que tiene sobre el consumo energético total de una EDAR, las medidas dirigidas a mejorar la eficiencia del sistema de aireación son las que tienen un mayor potencial de ahorro energético.

No obstante, hay otros numerosos aspectos donde se pueden conseguir ahorros energéticos, como por ejemplo en los equipos y sistemas de bombeo y agitación o mejorando el mantenimiento y la automatización de la planta.

En este trabajo se van a estudiar los agitadores sumergibles de baja velocidad, que son un equipo de agitación de alta eficiencia energética si los comparamos con otros sistemas de agitación utilizados en muchas depuradoras como los agitadores verticales o agitadores sumergibles compactos.

Por último, otro punto muy importante en la eficiencia energética de una EDAR es el proceso de digestión anaerobia que se lleva a cabo en el tratamiento de los fangos y que, como se ha comentado anteriormente, se genera una cantidad muy importante de metano.

Extrayendo este gas del reactor anaeróbico y combinándolo con un sistema de cogeneración, se puede abastecer alrededor de un tercio del consumo energético de la EDAR, lo que supone un ahorro en electricidad muy importante. No obstante, este sistema solo se suele utilizar en plantas que sirven a más de 100.000 habitantes equivalentes, ya que hay que hacer una gran inversión que no se rentabiliza para plantas más pequeñas.

3.3. Agitadores

Los agitadores son actualmente un equipo fundamental en el tratamiento de aguas residuales debido a la variedad de aplicaciones que tienen y a que son de gran utilidad dentro de una EDAR.

De este modo, dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales los agitadores realizan las siguientes funciones: generar un flujo, evitar la sedimentación de partículas en el fondo de los tanques y homogeneizar el fluido.

Hay que diferenciar entre dos tipos distintos de agitadores. Por una parte, están los agitadores verticales, los cuales se instalan de forma que el motor se encuentre fuera de los tanques de agua residual y por lo tanto pueden utilizar motores comunes que funcionan en seco. Por otra parte, están los agitadores sumergibles, que van unidos a un motor que también es sumergible. Este es el tipo de agitadores en el que nos vamos a centrar en este trabajo.



Figura 9: Agitador vertical

Antes de hablar más detalladamente de los distintos tipos de agitadores sumergibles, en la siguiente tabla se muestra una comparación de las principales ventajas y desventajas que tienen los agitadores verticales y los agitadores sumergibles.

	Ventajas	Desventajas
Agitadores sumergibles	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada eficiencia energética • Durabilidad • Muchas alternativas de posicionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Las directrices de posicionamiento son importantes porque de ellas depende el buen funcionamiento del agitador • Motor sumergido
Agitadores verticales	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizan motores estándar • Costes unitarios más bajos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren de un mayor espacio para su funcionamiento • No permiten generar un flujo direccional • La instalación es más complicada

Tabla 1: Comparación agitador sumergible y agitador vertical

3.3.1. Agitadores sumergibles

Un agitador sumergible es un equipo que permite generar un flujo de forma artificial. El objetivo de ese flujo puede ser transportar sustancias, mantener partículas sólidas en suspensión, homogeneizar fluidos con diferentes propiedades, disolver materiales en líquidos, favorecer reacciones biológicas y químicas o modificar las condiciones térmicas de un fluido.

Actualmente, los agitadores sumergibles se han convertido en un equipo importante dentro de las estaciones depuradoras de aguas residuales y cada vez se están desarrollando agitadores más eficientes que permiten conseguir la agitación deseada con un menor consumo eléctrico.

Dentro de los agitadores sumergibles hay que distinguir tres grupos que se diferencian entre sí por la velocidad de rotación de los mismos: agitadores de baja velocidad, de alta velocidad y de media velocidad.

Agitadores sumergibles de baja velocidad

Este tipo de agitadores sumergibles son capaces de aportar un gran empuje al fluido consumiendo poca energía, por lo que se trata del grupo de agitadores sumergibles

más eficientes. El tipo de agitador sumergible con el que se va desarrollar este trabajo pertenece a este grupo de agitadores de baja velocidad.

Se trata de agitadores de grandes dimensiones, cuyo diámetro oscila entre los 1200 y los 2600mm. Funcionan a baja velocidad de rotación, la cual oscila entre las 17 y 75 revoluciones por minuto. Las diferentes velocidades se consiguen utilizando motores con un distinto número de polos y mediante un sistema de engranajes.

Para la utilización de este tipo de agitadores sumergibles en una aplicación concreta es fundamental el posicionamiento del agitador. De este posicionamiento dependerá en gran medida el funcionamiento y la eficacia del agitador para conseguir un buen agitado.

Existen distintas opciones para la instalación de este tipo de agitadores dentro de los tanques de agua. Lo más habitual es utilizar algún puente o plataforma para colgar el equipo desde ahí y si no se da esta situación se coloca en un poste anclado al fondo del tanque donde se vaya a instalar.

Existen varias áreas de aplicación para los agitadores sumergibles dentro de una EDAR, sin embargo lo más habitual es utilizarlos en reactores biológicos y en tanques anóxicos.



Figura 10: Agitador sumergible de baja velocidad

Agitadores sumergibles de media velocidad

Se trata de un tipo de agitadores sumergibles que pueden adaptarse a una amplia variedad de condiciones de funcionamiento.

Tienen un diseño modular, lo que les permite reemplazar los álabes pudiendo de esta

forma cambiar el diámetro del agitador. Además, mediante la utilización de motores de diferentes polos y un sistema de engranajes, se puede trabajar en un amplio abanico de velocidades de rotación que oscilan entre 90 y 600 revoluciones por minuto. Esta versatilidad permite obtener unos resultados óptimos en una gran variedad de aplicaciones.

Además, este tipo de agitadores se instalan tanto fijados en un trípode anclado en el suelo de las balsas como en sistemas que permitan modificar la altura a la que funciona el agitador, lo que permite adaptarse a una gran variedad de geometrías.

Este tipo de agitadores suele utilizarse principalmente en procesos de tratamiento de fangos.



Figura 11: Agitador sumergible de media velocidad

Agitadores sumergibles de alta velocidad

Se trata de un tipo de agitadores muy compactos, cuya mayor virtud reside en el hecho de que pueden utilizarse en espacios pequeños ofreciendo un buen rendimiento a pesar de trabajar en un reducido espacio.

El hecho de que sean tan compactos y puedan trabajar en espacios pequeños los hace ideales para aplicaciones como evitar que se depositen partículas en los sumideros de las bombas o para instalarlos en balsas o aliviaderos con muy poco espacio para su ubicación.

Además, debido a su pequeño diámetro, pueden instalarse fácilmente en el fondo de las balsas y trabajar cuando el nivel de agua es muy bajo.



Figura 12: Agitador sumergible de alta velocidad

4. Fundamentos teóricos

En este apartado vamos a analizar los fundamentos teóricos que se utilizarán posteriormente para realizar el análisis de los resultados.

4.1. Perfil de velocidades

Estudiar el perfil de velocidades que genera el agitador es fundamental para conocer la capacidad de agitación que se puede conseguir con un agitador sumergible.

Además de conocer las velocidades que se alcanzan en cada punto, también es importante analizar cómo se forma el flujo y la estructura del mismo a medida que éste se va desarrollando cuando avanza. En la siguiente figura se puede observar la estructura típica que sigue el flujo generado por un agitador sumergible (7):

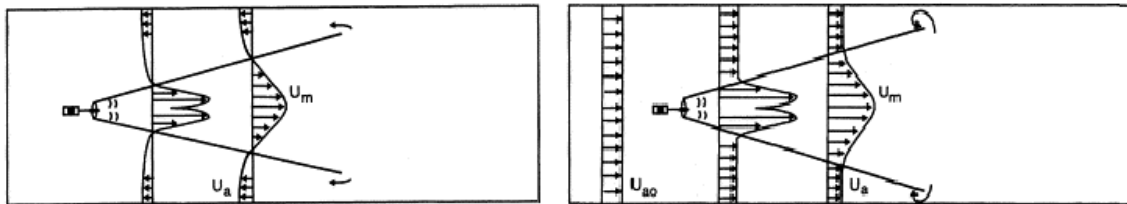


Figura 13: Estructura del flujo generado por un agitador sumergible

En la figura anterior se observa la estructura del flujo que genera un agitador en dos condiciones distintas: la imagen de la izquierda corresponde a un agitador situado en un tanque cerrado, de manera que al no existir un flujo de entrada, hay un contraflujo que circula en sentido opuesto al del flujo impulsado por el agitador; la imagen de la derecha corresponde a una situación en la que existe un flujo constante de entrada, previo al agitador, que hace que este contraflujo no se produzca o que su presencia sea prácticamente inapreciable.

En este trabajo, la mayoría de las simulaciones se realizarán con unas condiciones equiparables a las de la imagen de la derecha. Sin embargo, también se analizará alguna aplicación típica dentro de una EDAR en la parte de optimización, en la que el agitador se encuentra en una situación como la del tanque de la izquierda.

Aunque existen diferencias entre ambas situaciones, queda claro que el agitador impulsa el flujo, acelerándolo y provocando un incremento importante en su velocidad axial en ambos casos. El flujo que atraviesa el agitador y sale impulsado axialmente va perdiendo velocidad y ensanchándose progresivamente a medida que avanza.

En la zona más próxima al agitador, se observa en el perfil de velocidad que la máxima velocidad no se localiza en el centro. Esto se debe a que en el centro del agitador se halla su eje de rotación, el cual no impulsa al flujo. Cuando el flujo ya ha avanzado más,

la velocidad máxima se localiza en el centro.

Si se analiza el perfil de velocidades de un agitador sumergible más detalladamente, en la zona más próxima al mismo se observa que el flujo que sale del agitador se estrecha inicialmente y posteriormente empieza a ensancharse. En la siguiente figura se representa el flujo en la zona más próxima al agitador:

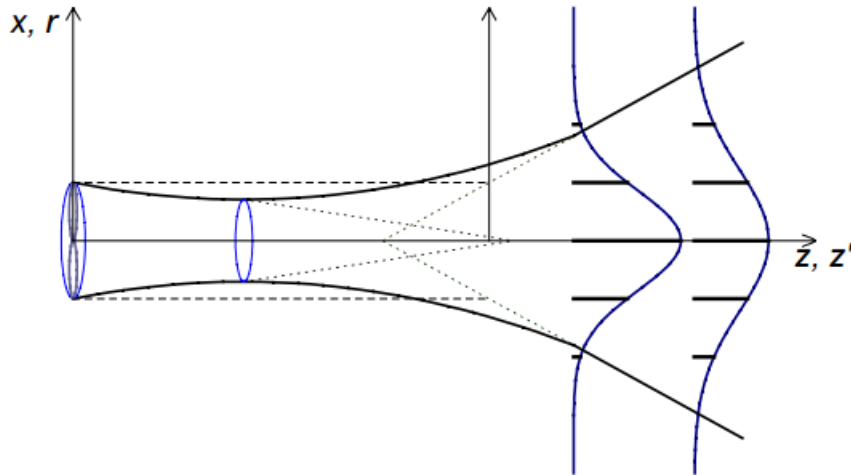


Figura 14: Vena contracta (8)

Esta zona dónde el flujo del agitador es más estrecho se llama vena contracta. Al tratarse del punto en el que el flujo impulsado por el agitador tiene una menor sección, corresponderá al punto en el que la velocidad axial es mayor.

Aunque la velocidad axial es la más significativa, cuando se estudia el comportamiento de un agitador sumergible también es importante analizar la evolución de las distintas componentes de la velocidad del flujo generado por el agitador.

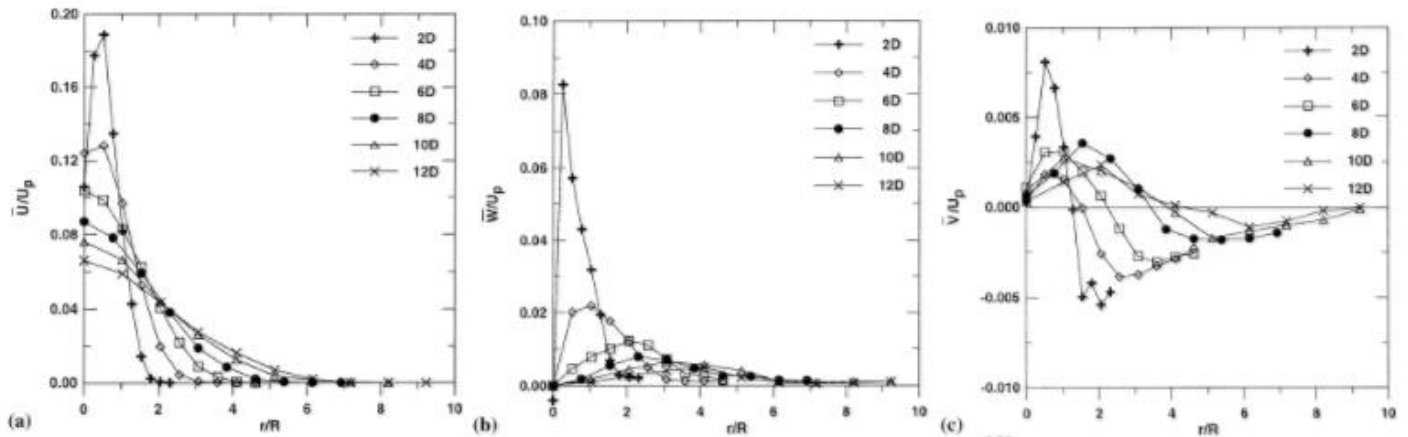


Figura 15: Perfiles de velocidades (u , w y v respectivamente (16)

En la figura anterior se muestra la evolución de la velocidad en sus tres componentes en función de la distancia axial respecto al agitador. En el apartado de resultados de este trabajo se estudiará principalmente la velocidad axial, pero también se tendrá en cuenta la velocidad vertical, que en la figura anterior corresponde a la segunda imagen. Las gráficas están normalizadas: la velocidad está normalizada con la velocidad periférica del agitador y la distancia con el radio del agitador.

En la gráfica de la velocidad u (velocidad axial) se observa lo que acabamos de comentar anteriormente. En la zona más próxima al agitador (línea 2D de la gráfica) la velocidad máxima no se encuentra en el centro. Se observa como a medida que nos vamos alejando del agitador la velocidad disminuye y el flujo se hace más ancho.

En la gráfica de la velocidad w (velocidad vertical) se observa cómo la máxima velocidad vertical se obtiene en la zona más próxima al agitador (línea 2D). Se puede observar cómo la velocidad vertical siempre es nula en el centro.

4.2. Arrastre

El fenómeno del arrastre es de vital importancia para comprender el comportamiento del flujo generado por un agitador sumergible.

Cuando el agitador impulsa el flujo a una determinada velocidad, se forma una discontinuidad entre la velocidad del flujo impulsado por el agitador y la velocidad del fluido que rodea al propio flujo. Esta discontinuidad provoca que se formen fluctuaciones que generan una turbulencia.

Esta turbulencia da lugar a que parte del fluido que rodea al flujo vaya uniéndose a éste. De esta forma, a medida que el flujo avanza, éste va arrastrando una mayor cantidad de caudal, ensanchándose los límites del flujo y aumentando su magnitud.

A medida que el caudal aumenta y el flujo se ensancha, disminuye la velocidad.

La cantidad de caudal arrastrado se puede determinar conociendo el caudal inicial que impulsa el agitador y el caudal en cada punto en concreto a medida que el flujo avanza. De esta forma el caudal arrastrado será igual a la diferencia entre el caudal en un punto y el caudal inicial:

$$Q_{\text{arrastrado}} = Q - Q_0$$

siendo Q el caudal a una determinada distancia y Q_0 el caudal inicial impulsado por el agitador.

En la siguiente figura se muestra una representación gráfica del fenómeno del arrastre:

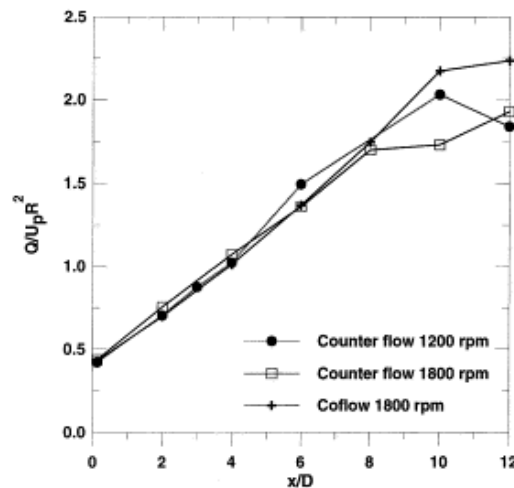


Figura 16: Arrastre (7)

La gráfica también está normalizada, en este caso el caudal arrastrado con la velocidad periférica y el radio del agitador, y la distancia con el diámetro. Se puede observar en la gráfica cómo el caudal arrastrado va aumentando a medida que aumenta la distancia.

El arrastre, en este caso, se puede considerar lineal hasta una distancia de $8D$ (siendo D el diámetro del agitador) y a partir de ahí se suaviza el incremento de caudal arrastrado. Hay que tener en cuenta que estos resultados corresponden a un agitador pequeño y que gira a alta velocidad. En la gráfica anterior dos líneas corresponden a un sistema en el que existe un contraflujo y otra línea con flujo a favor. En este trabajo los análisis se realizan en un sistema con flujo a favor.

4.3. Ángulo de expansión

El ángulo de expansión es otro factor importante a tener en cuenta, ya que determinará cómo se expande el flujo y nos permitirá conocer cuál es el alcance del flujo así como determinar en qué momento el flujo entrará en contacto con las paredes dentro de un determinado sistema donde se desee instalar el agitador.

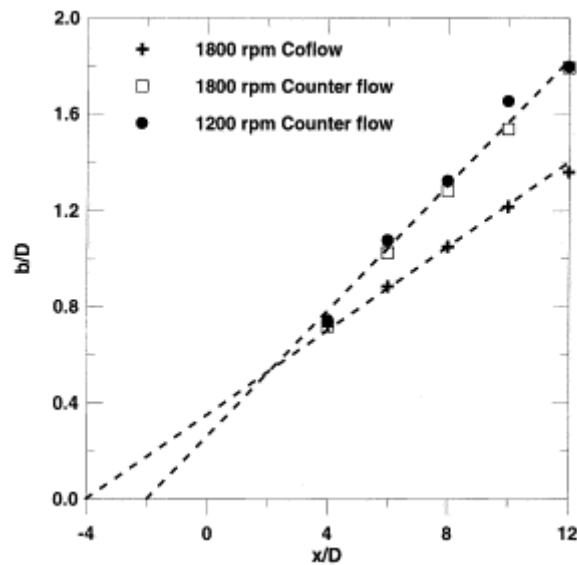


Figura 17: Ángulo de expansión (7)

En la gráfica anterior se representa el punto de separación entre el flujo impulsado por el agitador y el fluido que lo rodea. Se puede observar que el ángulo de expansión es mayor cuando existe un contraflujo que cuando el flujo es favorable. En condiciones de contraflujo, se obtiene el mismo ángulo de expansión para una velocidad de rotación de 1200rpm que para una velocidad de 1800rpm, por lo que la velocidad de rotación no parece tener gran influencia.

4.4. Efecto coanda

Una de las funciones principales que debe realizar un agitador sumergible es evitar que las partículas se depositen en el fondo de los tanques o balsas. Para ello es fundamental que en el fondo la velocidad del fluido sea lo suficientemente alta para que esto no se produzca.

Por este motivo, normalmente los agitadores sumergibles no se instalan de forma simétrica, sino que se colocan más cerca del fondo de los tanques para así conseguir que la velocidad sea lo suficientemente grande en esta zona.

El efecto coanda es un fenómeno que se produce precisamente por esta asimetría en la colocación del agitador sumergible dentro del tanque. De este modo, el flujo tenderá a moverse atraído por la pared más próxima, lo que provocará que si el agitador se instala a la suficiente profundidad, el flujo será absorbido por el muro del fondo y por lo tanto se conseguirá una mayor velocidad y una mayor agitación en el fondo evitando que se depositen las partículas.

En las siguientes figuras se puede observar cómo influye el efecto coanda sobre un

flujo.

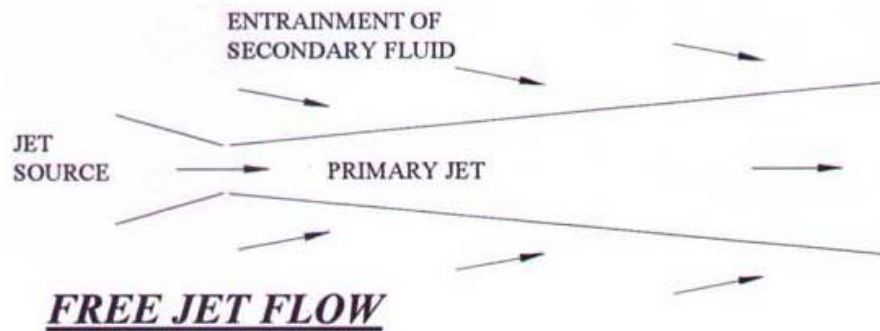


Figura 18: Flujo circulando libremente (9)

En la imagen anterior se muestra un flujo circulando libremente sin que haya ninguna superficie cercana que influya. Se puede observar que el flujo avanza de forma de simétrica.

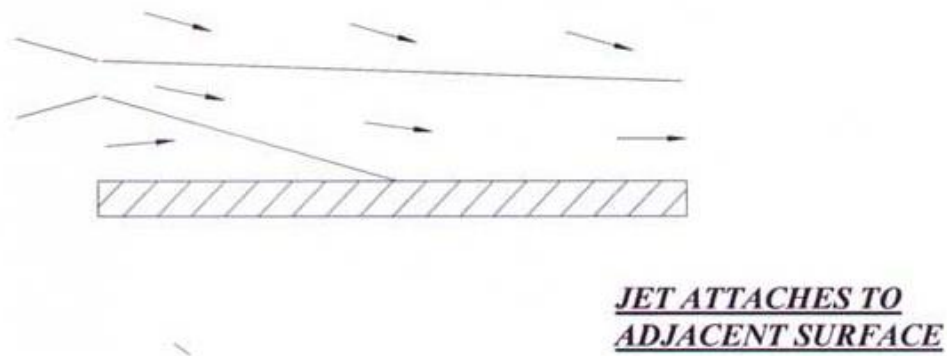


Figura 19: Flujo atraído por una superficie cercana (9)

Ahora se muestra un flujo que en este caso tiene una superficie cercana. Se observa claramente como el flujo es atraído por la superficie adyacente de manera que el flujo acaba circulando pegado a la superficie.

4.5. Empuje

El *thrust* o empuje es el parámetro más relevante de un agitador sumergible, ya que es el que determina la capacidad del agitador para aportar energía al fluido en el que se encuentra sumergido acelerándolo.

Por lo tanto, el empuje es la capacidad del agitador para impulsar el flujo añadiéndole velocidad. Este impulso se define como el producto entre la masa y el incremento de la

velocidad. Por lo tanto, para poder determinar el empuje hay que conocer el caudal másico que empuja el agitador y la velocidad a la entrada y salida del mismo.

En la práctica, se emplea un método más sencillo para determinar el empuje. Este método se basa en medir la fuerza que aparece sobre el agitador cuando éste está en funcionamiento. Esta fuerza es la reacción a la fuerza de empuje ejercida por el agitador y por lo tanto tiene la misma dirección pero sentido opuesto a la del flujo impulsado.

Para medir la fuerza de empuje se suele seguir la norma ISO 21630 *“Pumps – Testing – Submersible mixers for wastewater and similar applications”*. Los objetivos que persigue esta normativa ISO son los siguientes:

- Aumentar la uniformidad/compatibilidad en la caracterización del rendimiento del equipo, permitiendo una comparación entre agitadores.
- Simplificar la comunicación entre el cliente y el proveedor y proteger a los clientes.
- Reducir la necesidad de documentación.
- Aumentar la calidad y la eficiencia en la maquinaria y el proceso.

Los parámetros en los que se centra la norma para caracterizar el comportamiento de los agitadores son el empuje, la potencia eléctrica consumida y la ratio empuje-potencia para determinar la eficiencia del agitador.

En la norma se definen también las características que debe tener el fluido para realizar el ensayo. Los ensayos se realizan con agua cuyas condiciones quedan delimitadas según la siguiente tabla:

Characteristics	Unit	min.	max.
Temperature	°C	0	40
Kinematic viscosity	m ² /s	—	$1,75 \times 10^{-6}$
Density	kg/m ³	995	1 050
Non-absorbent free solid content	kg/m ³	—	2,5
Dissolved solid content	kg/m ³	—	50

Tabla 2: Características del agua en el ensayo de un agitador según la norma ISO 21630 (10)

En la siguiente figura se muestra un esquema del montaje que se realiza para medir el empuje de un agitador sumergible.

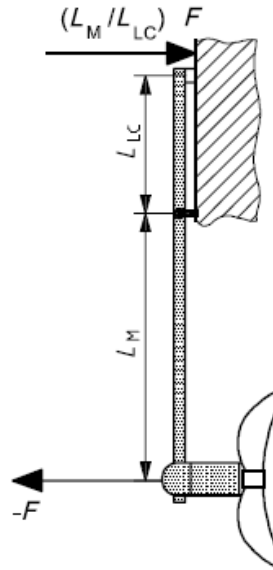


Figura 20: Medición experimental del empuje de un agitador (10)

Según el esquema de la imagen anterior y aplicando momentos, la fuerza de empuje del agitador sumergible se obtendría a partir de la siguiente expresión:

$$F_{\text{empuje}} = \frac{F \cdot L_{LC}}{L_M}$$

Como se ha comentado, ésta es la forma con la que las empresas suelen medir el empuje de sus agitadores en la práctica.

En este trabajo se calculará el empuje de dos formas distintas. Por una parte, la medición de la fuerza horizontal sobre el agitador que realiza el programa de cálculo utilizado y por otra se calculará el empuje de forma analítica.

Ya hemos comentado que el empuje es igual al producto de la masa por el incremento de velocidad. En la siguiente figura se muestra una representación esquemática del cambio de velocidades que se produce por la acción de un agitador:

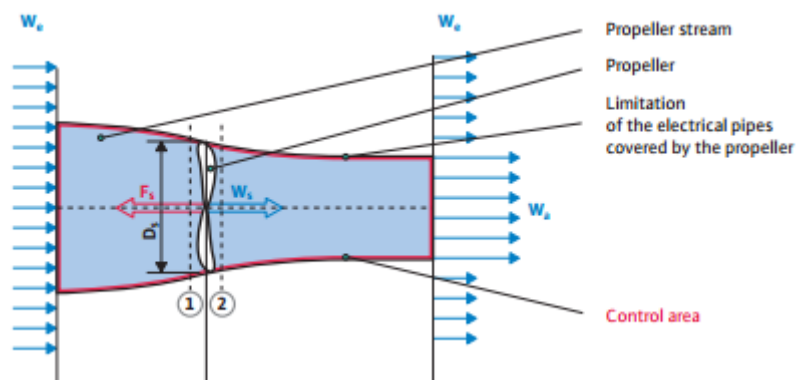


Figura 21: Cálculo analítico del empuje (11)

A partir del esquema anterior se puede determinar el empuje como la variación en la cantidad de movimiento antes y después del agitador. De este modo, a la entrada del agitador la cantidad de movimiento del flujo es igual a $m \cdot w_e$, mientras que a la salida la cantidad de movimiento es $m \cdot w_a$.

Por lo tanto, se calculará la fuerza de empuje del agitador con la siguiente expresión:

$$F_{empuje} = \dot{m} \cdot (w_a - w_e)$$

Esta es la expresión que se utilizará en el desarrollo de este trabajo para calcular el empuje de forma analítica.

Para calcular el empuje de los distintos agitadores sumergibles, se ha tratado de replicar las condiciones de ensayo que utiliza la empresa FAGGIOLATI PUMPS para medir el empuje de sus agitadores sumergibles. Este ensayo sigue la norma ISO 21630 a la que nos hemos referido anteriormente. En la siguiente figura se muestra una representación del ensayo.

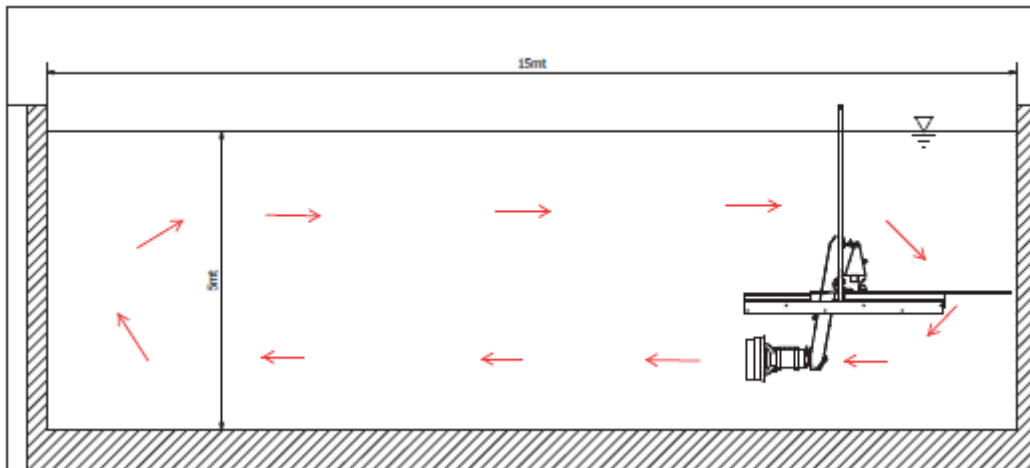


Figura 22: Ensayo para medir el empuje (12)

Las dimensiones de la piscina utilizada en las simulaciones para realizar este ensayo en el presente trabajo son mayores que las de la figura 22, ya que el diámetro de los agitadores estudiados es considerablemente mayor (entre 1200mm y 2500mm) al diámetro del agitador de la figura anterior (620mm).

4.6. Parámetros adimensionales

Aparte del empuje, existen otros parámetros utilizados para determinar el comportamiento de los agitadores sumergibles. En este sentido, destacan tres parámetros adimensionales como son el *flow number* (Fl), el *thrust number* (Th) y el *power number* (P_o). Los dos primeros están directamente relacionados con el flujo axial que genera el agitador, mientras que el P_o está relacionado con la potencia.

A continuación se muestra la expresión que define cada uno de estos parámetros:

$$Fl = \frac{Q_0}{ND^3}$$
$$Th = \frac{F}{\rho N^2 D^4}$$
$$P_o = \frac{P_0}{\rho N^3 D^5}$$

siendo N la velocidad de giro en rev/s, D el diámetro del agitador, ρ la densidad del fluido, Q_0 el caudal, F el empuje y P_o la potencia del motor del agitador.

Se puede observar cómo en las tres expresiones están presentes la velocidad de giro y el diámetro del agitador, siendo estas las dos características que diferencian los agitadores de un mismo tipo que serán estudiadas en este trabajo para ver cómo afectan a las características del flujo generado.

A partir de los parámetros definidos anteriormente se pueden definir otros parámetros como son el *parámetro c* y el *swirl number*.

El parámetro c es una constante que relaciona el *flow number* con el *thrust number*. A continuación se muestra su expresión:

$$Fl = c \cdot Th^{1/2}$$

siendo Fl y Th el *flow number* y el *thrust number* respectivamente. Los valores de este parámetro suelen ser de alrededor de 0,8 (8).

El *swirl number* hace referencia a lo turbulento que es un flujo. Cuanto mayor es el *swirl number* más turbulento será el flujo. El *swirl number* se puede calcular a partir de la siguiente expresión en la que se relaciona con el número de flujo y número de potencia y con la constante c .

$$c = Fl \cdot \left(\frac{\pi S}{P_o} \right)^{1/2}$$

Siendo c el parámetro c y Fl y P_o el flow number y power number respectivamente.

4.7. Eficiencia

Aunque existen distintas formas de medir la eficiencia de un agitador sumergible, probablemente la manera más intuitiva y más orientada al sistema en el que se utilice el agitador sea la ratio empuje-potencia.

Considerando un determinado sistema donde se instala un agitador sumergible, en régimen estacionario el empuje sería la fuerza que realiza el agitador para compensar todas las pérdidas de cantidad de movimiento que se producen en el sistema para de este modo mantener el movimiento del fluido constante. Así pues, conocido la ratio empuje-potencia del agitador podemos determinar la potencia necesaria a partir de las pérdidas que hay que compensar.

En la siguiente figura se muestra la eficiencia típica de diferentes tipos de agitadores sumergibles.



Figura 23: Ratio empuje-potencia de distintos tipos de agitadores (11)

Se puede observar en la imagen anterior cómo los agitadores de baja velocidad tienen eficiencias superiores a 600 N/kW, valores muy superiores a los agitadores de mayor velocidad.

4.8. Velocidad para evitar sedimentaciones

Para optimizar el proceso de agitación lo que debe conseguirse es minimizar al máximo el consumo energético cumpliendo con los requisitos de agitación necesarios.

Como ya se ha comentado, la función de un agitador sumergible es conseguir una agitación en el fluido que homogeneice el fluido y que evite que se depositen partículas en el fondo de las balsas. Como hemos señalado al inicio de este trabajo, los agitadores se utilizan en etapas posteriores a las iniciales en las que ya se eliminan

todas las partículas posibles mediante procedimientos físicos, por lo que la sedimentación de partículas no es un problema frecuente en estas etapas. Como hemos indicado, los agitadores sumergibles se utilizan en los reactores biológicos y en los tanques anóxicos, de manera que la principal función de la agitación es garantizar que las reacciones que se producen en estas etapas sean completas y afecten a toda la masa de agua residual y de fangos.

En la siguiente tabla se muestra la velocidad a la que sedimentan distintos tipos de partículas (13).

D (mm)	Clasificación	Velocidad de Sedimentación (mm/s)	Tiempo para sedimentar 0,3 m.
10,0	Grava	1000,00	0,3 seg.
1,0	Grava	100,00	3,0 seg.
0,1	Arena Gruesa	8,00	38 seg.
0,01	Arena Fina	0,154	33 min.
0,001	Bacterias	0,00154	35 horas
0,001	Coloides	0,0000154	230 días
0,0001	Coloides	0,000000154	63 años

Tabla 3: Velocidad de sedimentación de partículas

Teniendo en cuenta que las partículas más finas tienen una velocidad de sedimentación muy pequeña, en el apartado de optimización de este trabajo se fija una velocidad de agitación mínima de 0,05m/s.

4.9. Disposición típica de los agitadores

La posición de los agitadores dentro de los tanques es de vital importancia para conseguir que trabajen a pleno rendimiento y para alcanzar el nivel de agitación deseado. En este trabajo se tratará de optimizar el proceso de agitación en los tanques en que se utilizan agitadores sumergibles en una EDAR, que como ya se ha comentado son los reactores biológicos y los tanques anóxicos. En las siguientes figuras se muestra la geometría típica de estos tanques y la disposición recomendada de los agitadores.

- **Tanques anóxicos**

Se trata de tanques cerrados para evitar la presencia de oxígeno. Suelen ser tanques rectangulares o cilíndricos. En la siguiente figura se muestra un tanque rectangular y la disposición recomendada del agitador, que en este caso se ha colocado en una esquina:

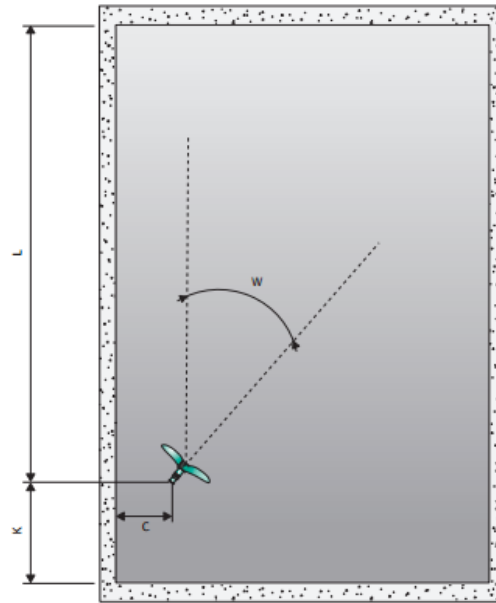


Figura 24: Tanque rectangular

- **Reactores biológicos con aireación**

Los reactores biológicos están descubiertos y, además, disponen de un sistema de aireación para introducir oxígeno en el fluido. Las geometrías más típicas son tanques de recirculación rectangulares o anulares.

En las dos siguientes figuras se muestra este tipo de reactores y la disposición que se recomienda para los agitadores sumergibles.

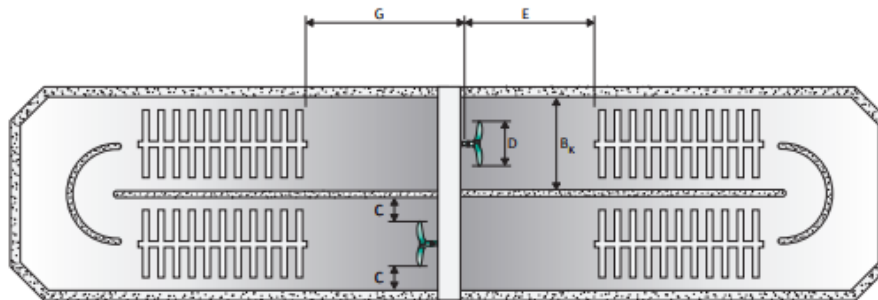


Figura 25: Tanque de recirculación con aireación

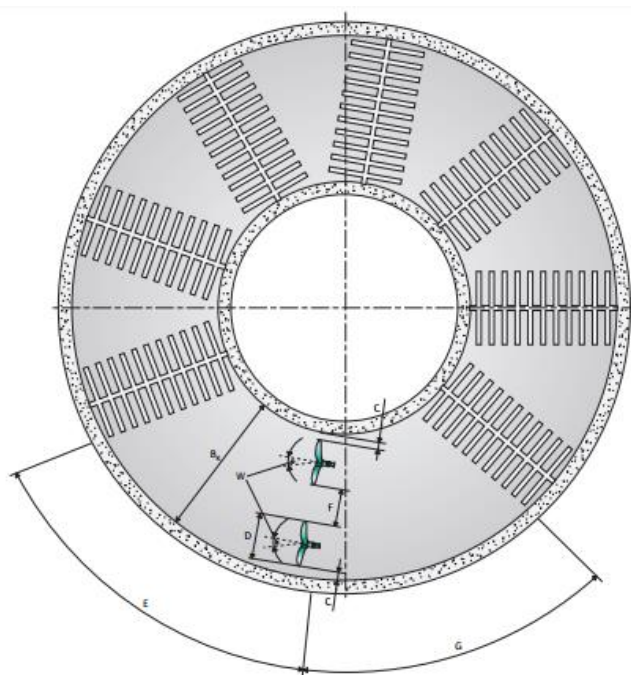


Figura 26: Tanque anular con aireación

5. Consideraciones previas

En este apartado se van a explicar los distintos aspectos que se han tenido en cuenta para realizar las simulaciones. De este modo, se analizarán los conceptos de mecánica de fluidos que se utilizan para resolver las ecuaciones de las simulaciones, el método y programa de cálculo utilizado, las características del sistema usado en la simulación y los distintos parámetros del agitador utilizados en cada simulación.

5.1. Método de cálculo

El método de cálculo utilizado en las simulaciones es el de los volúmenes finitos. Se trata de una técnica que permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es el método de cálculo más utilizado para resolver problemas complejos relacionados con la mecánica de fluidos, aunque también se puede utilizar para resolver otro tipo de problemas.

En el cálculo por volúmenes finitos el dominio o sistema que se va a calcular se subdivide en pequeños volúmenes de control y las variables se almacenan en los nodos. Los nodos pueden situarse en los vértices de los volúmenes o en el centro. El conjunto de volúmenes de control y nodos forman lo que se conoce como malla. De este modo se consigue simplificar la resolución del sistema, convirtiendo un problema complejo en problemas más simples.

Los pasos que se siguen en la resolución de un problema por volúmenes finitos son los siguientes:

- Se descompone el sistema en volúmenes de control.
- Se formulan las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control.
- Se aproximan numéricamente las integrales.
- Se aproximan los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables de los nodos.
- Se ensambla y se resuelve el sistema algebraico obtenido.

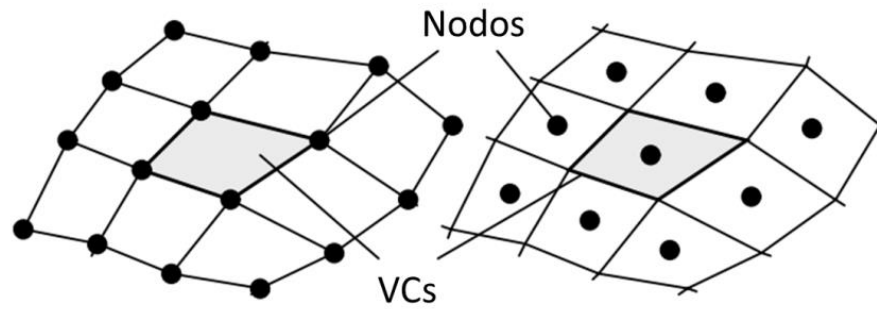


Figura 27: Nodos en los vértices y en los centros respectivamente (14)

5.2. Programa de cálculo

El programa de cálculo utilizado en este trabajo es el *software* de simulación *ANSYS® Academic Research, Release 16.2*, que permite resolver toda variedad de problemas de ingeniería. En concreto, para este trabajo se ha utilizado la herramienta *CFX*, un *software* de dinámica de fluidos computacional que nos permite solucionar problemas como los que se tratan en este trabajo. Se ha utilizado la versión para estudiantes (15).

5.3. Simulaciones

En este apartado se hablará sobre los distintos elementos que se han tenido en cuenta a la hora de realizar las simulaciones para posteriormente poder analizar los resultados obtenidos. En este sentido, se detallará la geometría del sistema que se ha utilizado, las ecuaciones que utiliza el programa para resolver el sistema, las condiciones de contorno y los parámetros del agitador en cada una de las simulaciones. También se explica cómo se ha realizado el mallado y cómo se realiza la configuración de cada simulación:

5.3.1. Mallado del sistema

Antes de explicar cómo se realiza el mallado del sistema hay que aclarar un elemento importante.

Para realizar las simulaciones se utiliza la geometría de un agitador sumergible, en concreto el modelo Amaprop de la empresa KSB, como se explica en la sección “5.3.4. Parámetros del agitador en cada simulación”.

Podría parecer lógico que simplemente se introduzca la geometría sólida del agitador dentro del fluido y se le aplique un movimiento rotativo para simular el funcionamiento del agitador. Sin embargo, lo que realmente se hace para que la

herramienta CFX de ANSYS interprete correctamente los resultados, es crear un volumen que envuelva al agitador a modo de encapsulado, y posteriormente eliminar de este encapsulado el volumen del agitador. De este modo se obtiene un volumen que tendrá las mismas características que el resto del fluido de la simulación y al que se le aplicará un movimiento rotativo que permitirá simular el comportamiento del agitador. En la siguiente figura se muestra este encapsulado y dentro, en color rojo, el volumen del agitador que se sustrae del encapsulado:

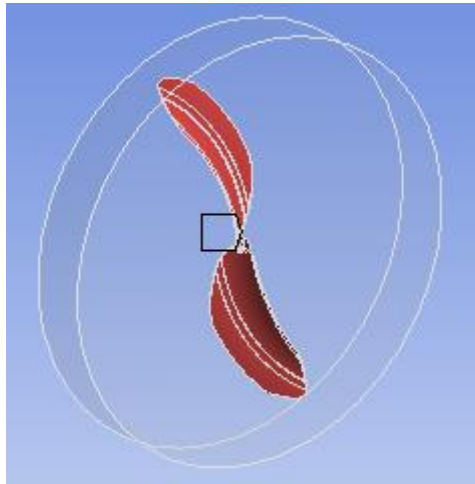


Figura 28: Volumen rotativo para las simulaciones

El mallado se realiza de forma progresiva, de modo que la zona más próxima al agitador tiene un mallado muy fino y a medida que nos vamos alejando el tamaño de los elementos se hace más grande y por lo tanto la malla es más gruesa. Se ha prestado especial atención a realizar un buen mallado de la superficie del agitador que, como se acaba de explicar, serían las caras internas del volumen rotativo creado. Para mallar correctamente esta superficie, aparte de realizar un mallado fino del volumen rotativo, se ha aplicado la técnica de mallado que se conoce cómo "*Inflation*". En la siguiente figura se muestra el mallado del volumen rotativo, aplicando una sección para poder ver la superficie interna:

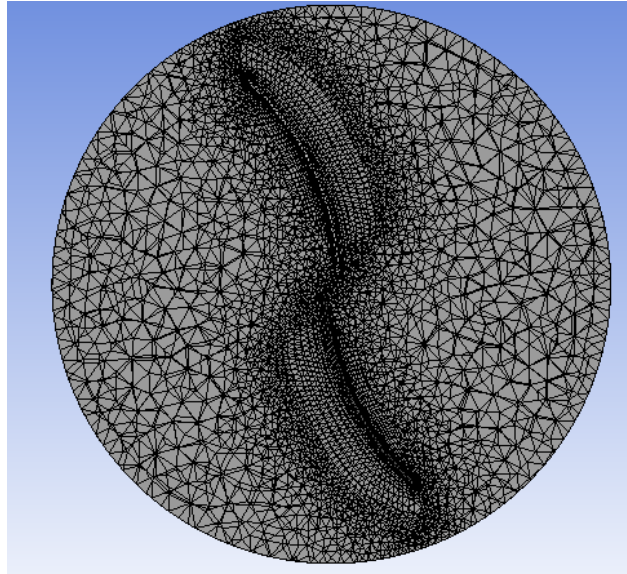


Figura 29: Mallado del volumen rotativo

Se puede observar como la superficie interna está mallada más fina, precisamente por el “*Inflation*” que se ha aplicado a esa superficie. En la siguiente figura se muestra el mallado de todo el sistema:

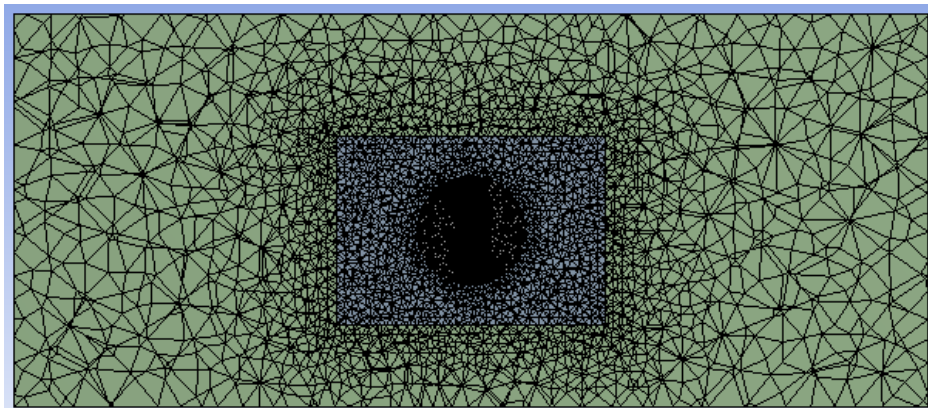


Figura 30: Mallado del sistema

En la figura 30 se observa una sección realizada sobre el sistema a la altura del agitador. Se puede ver claramente como el mallado es progresivo, siendo más gruesa la malla a medida que nos alejamos del mismo.

5.3.2. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

El programa de simulación utiliza una serie de ecuaciones de mecánica de fluidos para resolver el sistema. Estas ecuaciones son la ecuación de continuidad, la ecuación de

momentos y las ecuaciones para flujo turbulento, que en este caso siguen el modelo k-epsilon. Estas dos ecuaciones para el flujo turbulento son la ecuación de la energía cinética y la ecuación de la velocidad de disipación de turbulencia. A continuación se muestran estas ecuaciones:

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0$$

- Ecuación de momentos

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M$$

donde S_M es la suma de las fuerzas de los cuerpos, μ_{eff} es la viscosidad efectiva para la turbulencia y p' es la presión modificada.

El modelo k-epsilon está basado en el concepto de viscosidad de turbulencia, por lo que:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

donde μ_t es la viscosidad de la turbulencia. El modelo asume que esta viscosidad de turbulencia está relacionada con la energía cinética de la turbulencia y la velocidad de disipación de la turbulencia a través de la siguiente relación:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Los valores de k y de ε se obtienen de las siguientes ecuaciones:

- Ecuación de la energía cinética de la turbulencia

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}$$

- Ecuación de la velocidad de disipación de la turbulencia

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 3} P_{\varepsilon b})$$

donde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε son constantes cuyos valores son 1'44, 1'92 y 1'3 respectivamente.

P_{kb} y $P_{\varepsilon b}$ representan la influencia de las fuerzas de flotabilidad, mientras que P_k es la producción de turbulencia debida a fuerzas viscosas:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

$$P_{\varepsilon b} = C_3 \cdot \max(0, P_{kb})$$

donde C_3 es el coeficiente de disipación y vale 1.

5.3.3. Geometría de las simulaciones

A lo largo del trabajo se realizan simulaciones con distintas geometrías en función de lo que se esté estudiando en cada momento. De ese modo, se pueden agrupar las simulaciones en tres grupos distintos:

- Simulaciones en canal abierto para analizar las características del flujo generado por el agitador.
- Simulaciones para calcular el empuje del agitador siguiendo la norma ISO 21630.
- Simulaciones para optimizar el proceso de agitación dentro de los tanques en los que se suelen utilizar agitadores sumergibles dentro de una EDAR.

A continuación se explica detalladamente la geometría de estas simulaciones y las condiciones de contorno establecidas:

Simulaciones en canal abierto para analizar las características del flujo generado por el agitador

La geometría utilizada en estas simulaciones pretende ser lo suficientemente grande como para que el contorno no tenga un efecto significativo sobre el comportamiento del flujo impulsado por el agitador.

En la figura siguiente se muestra la geometría básica que se ha utilizado en las simulaciones:

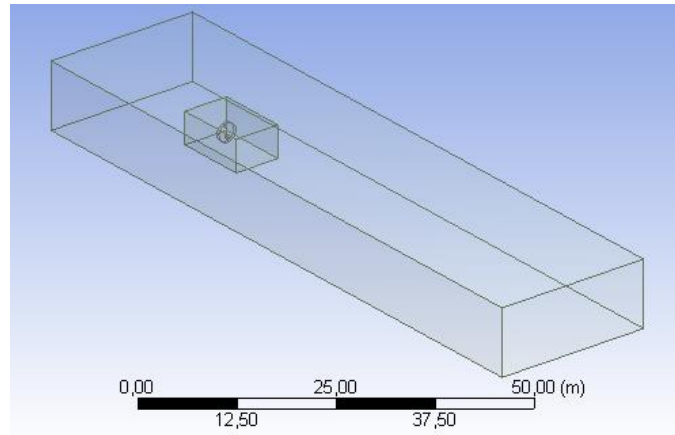


Figura 31: Geometría de la simulación

La geometría de la figura anterior corresponde a una geometría rectangular que tiene 90 metros de largo por 20 de ancho. El agitador está situado a 20 metros de la pared posterior y a 70 metros de la pared opuesta, siendo esta la dirección hacia la que impulsa el flujo. El agitador está centrado respecto a las paredes laterales y está situado a una profundidad de 5 metros dentro de una altura total de 9 metros.

Se puede observar que existe un volumen rectangular más pequeño, dentro del cual se encuentra el agitador. La única función que realiza este volumen es conseguir un mallado más fino en las proximidades del agitador para conseguir unos resultados más precisos.

Con las condiciones de contorno que se han establecido, se ha imitado un canal rectangular descubierto en el que el flujo entra por un lado, es acelerado por el empuje del agitador y sale por el lado opuesto. Para simular esta situación, se han establecido las siguientes condiciones de contorno:

- Entrada de agua: en la pared que se encuentra en la parte de succión del agitador (la más próxima) se ha establecido la condición de que entra un caudal de agua constante a una velocidad de 0,2m/s.
- Salida de agua: por la pared opuesta será por donde salga el agua libremente. Se coloca una condición de presión estática relativa de 0Pa.
- Paredes laterales y fondo: estas paredes serían los muros. Se coloca una condición de contorno de no deslizamiento, lo que significa que las partículas en contacto con las paredes no tienen velocidad.

La condición de no deslizamiento es la interpretación del hecho de que cuando un fluido en movimiento entra en contacto con un sólido, por la propia viscosidad del fluido, éste se pega sobre la superficie del sólido y por lo tanto no tiene velocidad.

En la siguiente imagen se muestra una representación de la condición de no deslizamiento:



Figura 32: Condición de no deslizamiento

En la siguiente figura se muestra una representación de las condiciones de contorno tal y como las muestra el programa:

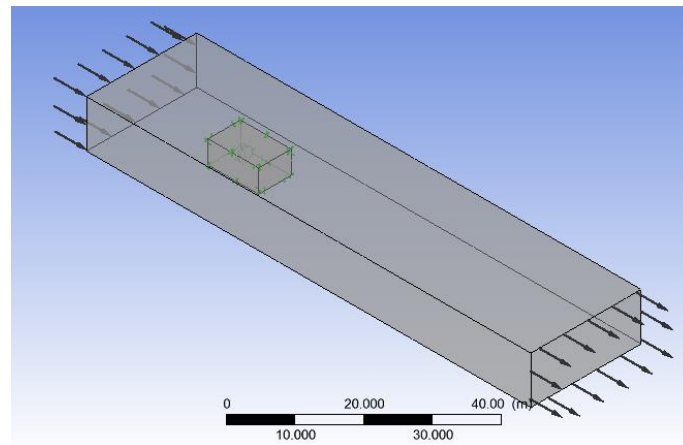


Figura 33: Condiciones de contorno

Las flechas que entran representan la condición de entrada de caudal mientras que las flechas que salen representan la condición de presión estática. La condición de no deslizamiento anteriormente explicada no es representada por el programa por ningún símbolo aunque sí que está presente. En la siguiente tabla se resume las características de esta simulación:

Canal abierto	
Dimensiones	40m x 13m x 6,5m
Modelo de resolución	Modelo k-ε
Condiciones de contorno	<ul style="list-style-type: none"> • Inlet: 0,2m/s • Outlet: Pa=0Pa • Muros: no deslizamiento

Tabla 4: Resumen simulación canal abierto

Simulaciones para calcular el empuje del agitador siguiendo la norma ISO 21630

En la sección “4.5. *Empuje*” se ha explicado cómo se debe realizar el ensayo para medir el empuje de un agitador sumergible según la norma ISO 21630. A continuación se muestra la geometría utilizada:

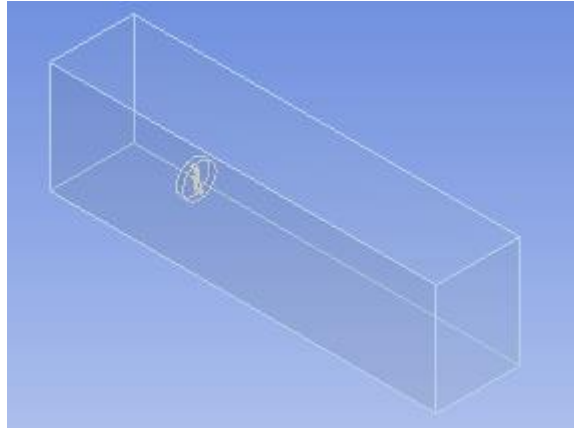


Figura 34: Geometría para el ensayo del empuje

Se trata de un tanque abierto por la parte superior, cuyas dimensiones son 30m x 6m x 8m. En este caso la única condición de contorno es que todas las paredes, salvo la superior, se consideran muros y por lo tanto tienen la condición de no deslizamiento explicada anteriormente. En la siguiente tabla se resumen las características de esta simulación:

Ensayo para medir el empuje	
Dimensiones	30m x 6m x 8m
Modelo de resolución	Modelo k- ϵ
Condiciones de contorno	Muros: no deslizamiento

Tabla 5: Resumen simulación del ensayo para medir el empuje

Simulaciones para optimizar el proceso de agitación dentro de los tanques en los que se suelen utilizar agitadores sumergibles dentro de una EDAR

Anteriormente, en la sección “4.9. *Disposición típica de los agitadores*” se han explicado las disposiciones recomendadas de los agitadores dentro de los tanques.

Estas simulaciones corresponden al apartado de optimización, por lo que no se ha utilizado una única disposición, sino que se ha ido jugando con la colocación de los agitadores para encontrar la solución óptima. A continuación se muestra una de las disposiciones para cada caso:

- Tanque rectangular

El tanque rectangular tiene unas dimensiones de 25m x 15m x 6m. En este caso, al igual que en todos los siguientes, la única condición de contorno que se ha definido es la condición de no deslizamiento en todos los muros del tanque. En la siguiente imagen se muestra la geometría de la simulación:

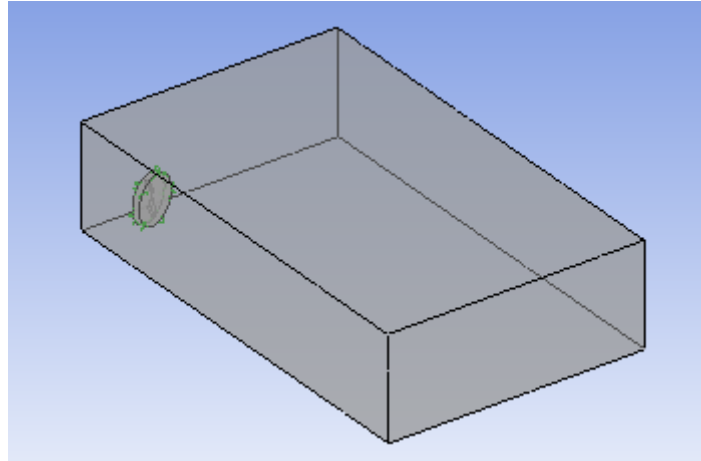


Figura 35: Geometría del tanque rectangular

En la siguiente tabla se resume las características de esta simulación:

Tanque rectangular	
Dimensiones	25m x 15m x 6m
Modelo de resolución	Modelo k- ϵ
Condiciones de contorno	Muros: no deslizamiento

Tabla 6: Resumen simulación tanque rectangular

- Tanque de recirculación

El tanque de recirculación tiene unas dimensiones de 40m x 13m x 6,5m, con un muro central de 1 metro de ancho y 28 de largo. La condición de contorno utilizada es la de no deslizamiento en los muros. En la siguiente imagen se muestra la geometría de la simulación:

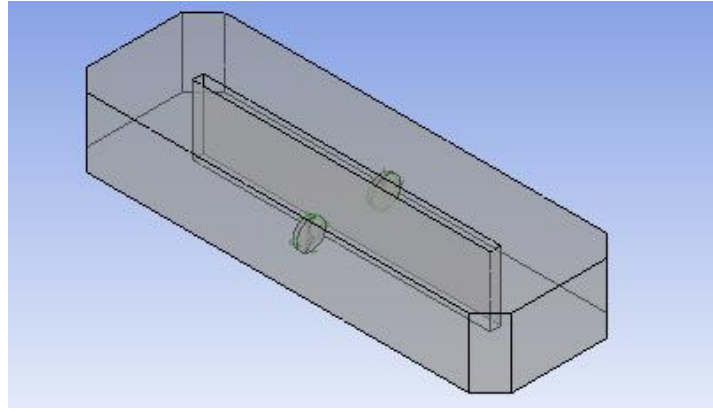


Figura 36: Geometría del tanque de recirculación

En la siguiente tabla se resume las características de esta simulación:

Tanque de recirculación	
Dimensiones	40m x 13m x 6,5m
Modelo de resolución	Modelo k- ϵ
Condiciones de contorno	Muros: no deslizamiento

Tabla 7: Resumen simulación tanque de recirculación

- Tanque anular

El tanque anular tiene un diámetro exterior de 30m y un diámetro interior de 15m, con una profundidad de 6,5m. De igual modo que en los casos anteriores, la única condición de contorno es la de no deslizamiento en los muros. En la siguiente imagen se muestra la geometría de la simulación:

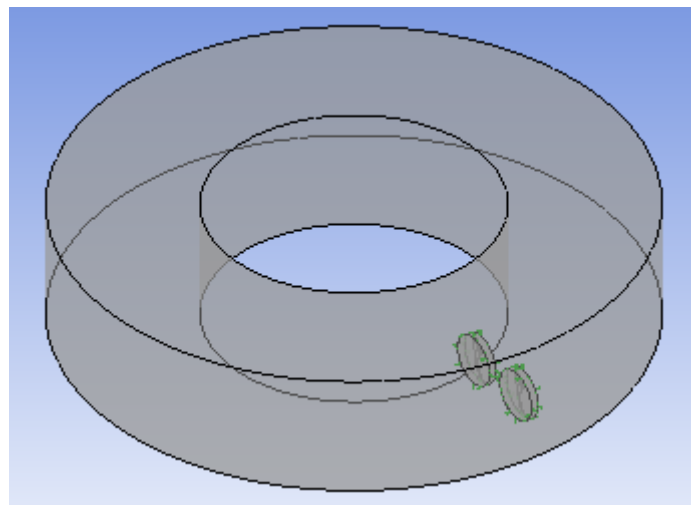


Figura 37: Geometría del tanque anular

En la siguiente tabla se resume las características de esta simulación:

Tanque anular	
Dimensiones	Dext = 30m, Dint = 15m, h=6,5m
Modelo de resolución	Modelo k-ε
Condiciones de contorno	Muros: no deslizamiento

Tabla 8: Resumen simulación tanque de recirculación

5.3.4. Parámetros del agitador en cada simulación

Para la realización de este trabajo se ha utilizado un agitador sumergible de la empresa KSB, en concreto el modelo Amaprop. Se trata de un agitador sumergible de baja velocidad con dos álabes. En la siguiente imagen se muestra el aspecto de este agitador:



Figura 38: Agitador sumergible Amaprop

Se han realizado simulaciones con distintos parámetros del agitador para así poder estudiar cómo afectan al funcionamiento del agitador y a las características del flujo generado. En este caso, los parámetros que se han considerado son el diámetro y la velocidad de giro.

La parte principal del análisis de resultados se realiza sobre un agitador con un diámetro de 2500mm y una velocidad de giro de 34rpm. Posteriormente se aplican variaciones en estos parámetros modificando el tamaño del agitador entre 1200mm y 2500mm y la velocidad de giro entre 27rpm y 59rpm. En la siguiente tabla se muestran los parámetros de cada simulación:

Simulación	Diámetro (mm)	Velocidad (rpm)
1	1200	34
2	1200	59
3	1800	34
4	2500	27
5	2500	34
6	2500	46

Tabla 9: Parámetros de las simulaciones

En todos los casos, el fluido utilizado en las simulaciones es agua. Las propiedades concretas del agua utilizadas por el programa son las siguientes:

Propiedades del agua en las simulaciones	
P_{ref}	1 atm
T_{ref}	25°C
ρ	997 kg/m ³

Tabla 10: Propiedades del agua en las simulaciones

6. Resultados

6.1. Análisis del flujo

6.1.1. Estructura del flujo

Cómo reiteradamente hemos comentado, la función de un agitador sumergible instalado en una EDAR es conseguir generar un movimiento en el fluido que permita homogeneizarlo y evitar que se depositen partículas en el fondo de los tanques.

En primer lugar vamos a analizar la estructura del flujo, es decir, el comportamiento general que se observa en el flujo cuando éste se ve afectado por el agitador.

En la Figura 39 se puede observar la acción que realiza el agitador. Al girar, el agitador succiona el fluido por uno de sus lados. Este fluido, que es atraído por el agitador, es acelerado por los álabes e impulsado hacia delante a una velocidad mayor que la velocidad de entrada.

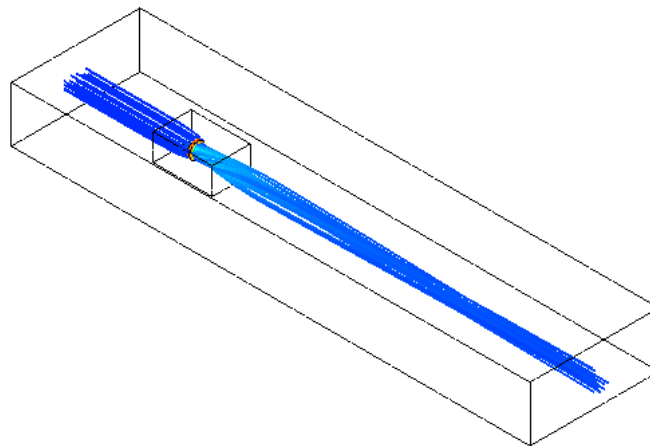


Figura 39: Estructura del flujo

En la imagen anterior únicamente se observa la parte del fluido que circula por dentro del agitador y que experimenta el empuje de éste. Sin embargo, todo el fluido de alrededor, aunque no pase directamente por el agitador, también se ve afectado por éste.

De este modo, el fluido que rodea al flujo lanzado por el agitador es arrastrado y se une al flujo, aumentando el volumen y caudal del mismo, y reduciéndose progresivamente la velocidad. Este fenómeno del arrastre se analizará más en detalle posteriormente.

Como acabamos de comentar, el fluido que se encuentra aguas arriba del agitador es succionado por éste. En la siguiente imagen se puede observar precisamente cómo el fluido es succionado hacia el centro del agitador.

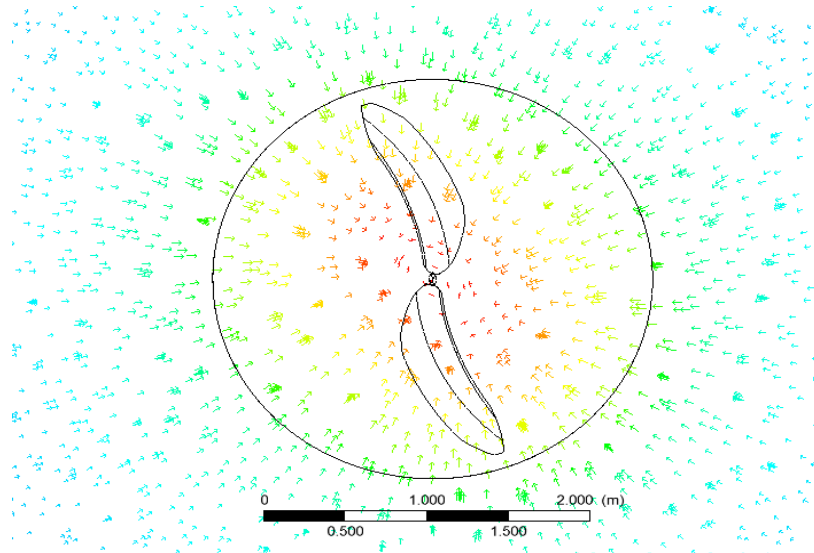


Figura 40: Fluido succionado por el agitador

En la Figura 40 se puede observar cómo a medida que nos aproximamos más al eje de rotación del agitador la velocidad del fluido aumenta (flechas rojas). El gradiente de velocidades es muy claro, desde las flechas azules en la zona exterior donde la velocidad es más pequeña hasta las flechas rojas del centro.

En la Figura 41 se representa el comportamiento del fluido aguas abajo, inmediatamente después de haber sido impulsado por el agitador.

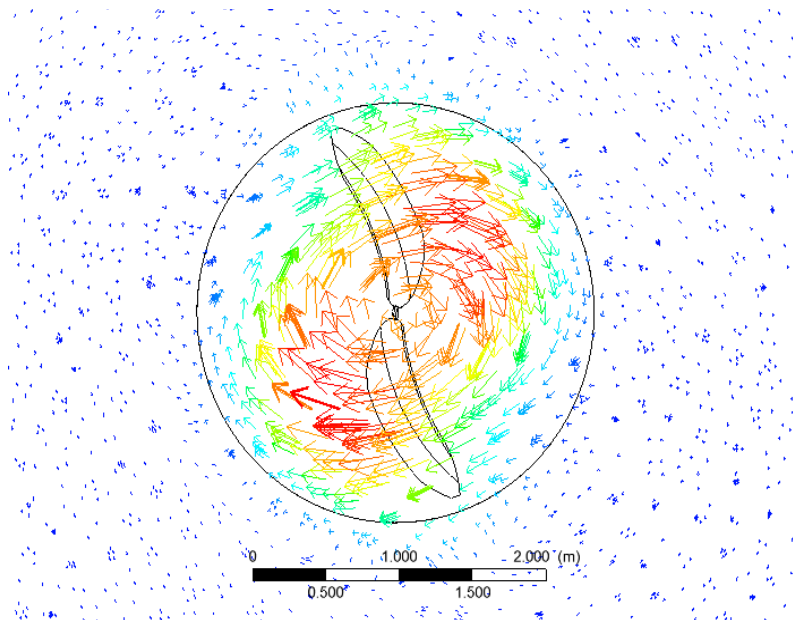


Figura 41: Fluido empujado por el agitador

En la imagen anterior se puede observar cómo los álabes aceleran el fluido y éste es lanzado hacia delante describiendo un movimiento circular que se propaga en

dirección axial. Las flechas rojas indican las partes del fluido con una mayor velocidad y las azules oscuras las de menor.

En la figura 42 se observa la misma distribución de vectores de velocidad que en la figura 41, pero en este caso visto de forma lateral en lugar de frontal, para poder apreciar más claramente la diferencia de velocidades.

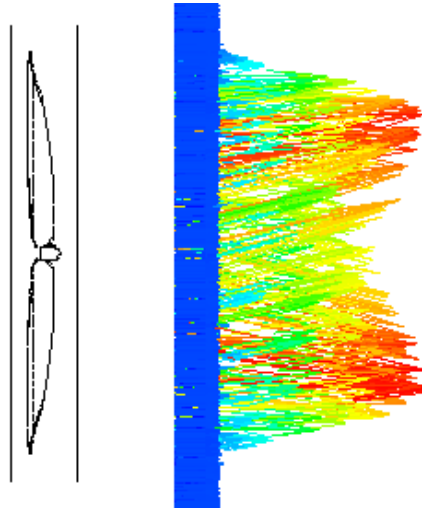


Figura 42: Vista lateral de la distribución de vectores de velocidad

Observando las figuras 41 y 42 se puede ver claramente como la acción del agitador sobre el fluido provoca, mediante el movimiento circular de los álabes, que el fluido rote y sea empujado en dirección axial.

Se puede ver que el fluido no sale lanzado con la máxima velocidad en la zona central del agitador, sino que la máxima velocidad axial se obtiene aproximadamente en la dirección perpendicular a cada uno de los álabes.

En la figura 43 se observa una vista superior de un plano horizontal a la altura del centro del agitador, donde se puede observar más claramente la estructura del flujo.

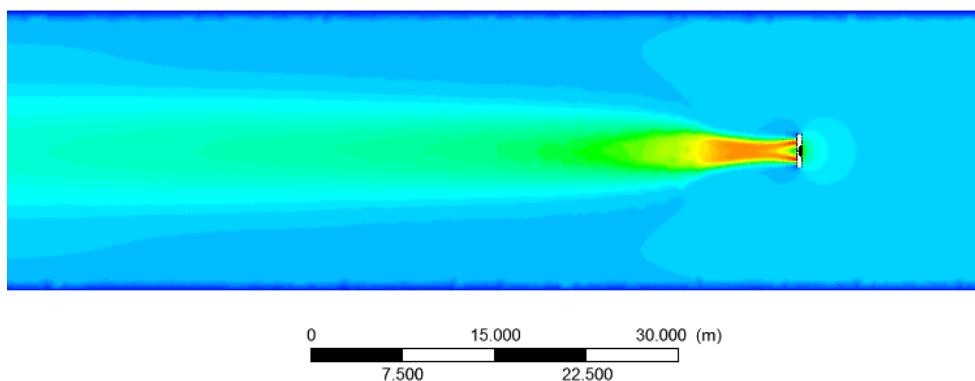


Figura 43: Vista superior del flujo

Se puede ver como el fluido sale empujado por el agitador en dirección axial a alta

velocidad. A medida que el flujo se aleja del agitador, se ensancha y disminuye su velocidad de forma progresiva. Más adelante se analizará el ángulo de expansión del flujo.

Se observa también que el fluido que rodea al flujo, una vez éste ya está estabilizado, tiene una velocidad inferior a la velocidad inicial del fluido. Como el caudal que circula es constante y la superficie de cualquier sección también, la velocidad media debe ser la misma en cualquier sección, y por tanto, si en el centro la velocidad del flujo es mayor que la inicial por la aceleración que le transmite el agitador, la velocidad en el exterior tendrá que ser menor a la inicial.

A continuación, en la figura 44, se puede observar con más detalle la zona del flujo más próxima al agitador.

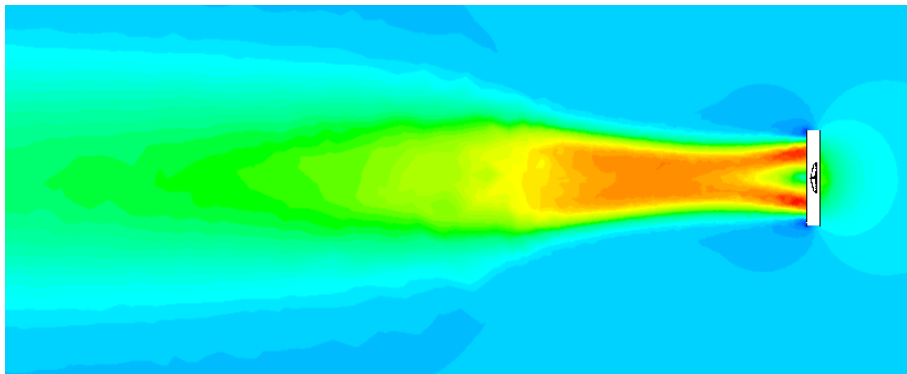


Figura 44: Vista superior del flujo en la zona del agitador

Se observa que inicialmente el fluido empujado por el agitador no se ensancha en la zona más próxima a éste. Esta zona más próxima al agitador es lo que se conoce como zona de formación del flujo y en este caso tiene una longitud aproximada similar al diámetro del agitador, es decir, 2,5 metros.

La zona en la que el flujo se estrecha y, por tanto, dónde la velocidad es mayor, recibe el nombre de “vena contracta”, como ya se ha explicado anteriormente en la sección “4.1. Perfil de velocidades”.

Se puede observar que justo contra el agitador, en la zona central, el fluido prácticamente no ha aumentado su velocidad. Esto se debe a que en esta zona se encuentra el eje de rotación, y por tanto, el fluido no es acelerado por los álabes.

También se observa que en los bordes de los álabes, el fluido tiene una velocidad muy pequeña y se forman una especie de remolinos. Este comportamiento es típico en el funcionamiento de los agitadores sumergibles. En este caso el flujo de los dos remolinos no llega a ser succionado de nuevo por el agitador, pero hay muchos casos en los que no existe una circulación del fluido siempre en la misma dirección, y por lo tanto, se produce un contraflujo que hace que el flujo de estos remolinos sí que vuelva al agitador.

6.1.2. Análisis de velocidades

En este apartado se va a analizar tanto la velocidad axial como la velocidad radial, o lo que es lo mismo, la velocidad en el eje x y la velocidad en el eje y respectivamente, para el sistema que estamos estudiando.

En primer lugar vamos a ver la distribución de las velocidades axiales, ya que es la componente de la velocidad que más nos interesa conocer. En la figura 45 podemos observar esta distribución de velocidades.

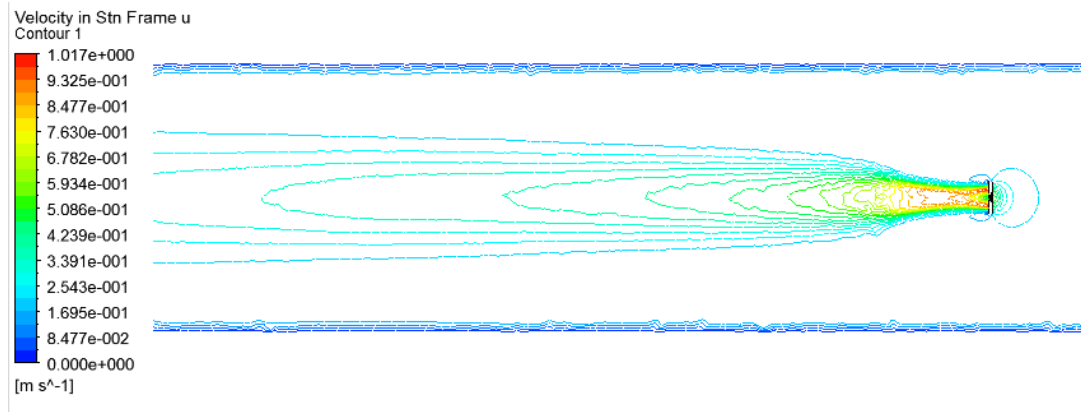


Figura 45: Distribución de la velocidad axial

En la figura anterior podemos observar que la mayor velocidad axial que se alcanza es de 1m/s. Esta velocidad se da inmediatamente a la salida del agitador y no en la zona central, sino aproximadamente en la perpendicular del centro de cada uno de los álabes, como ya se ha comentado anteriormente.

En la zona donde el flujo ya está estabilizado, la velocidad máxima que se alcanza es de aproximadamente unos 0,9m/s (zona anaranjada). A partir de ahí, como hemos comentado en el apartado anterior de estructura del flujo, se produce un ensanchamiento y un descenso progresivo de la velocidad.

En la zona de succión se observa un incremento de velocidad, aunque el fluido no alcanza una magnitud importante, sino que se queda en un valor que ronda los 0,3m/s.

A continuación, en la figura 46 se representa gráficamente el perfil de la velocidad axial para distintas distancias respecto del agitador. Las distancias que se han tomado corresponden a la zona donde el flujo ya está estabilizado. Las distancias se han normalizado con el diámetro del agitador.

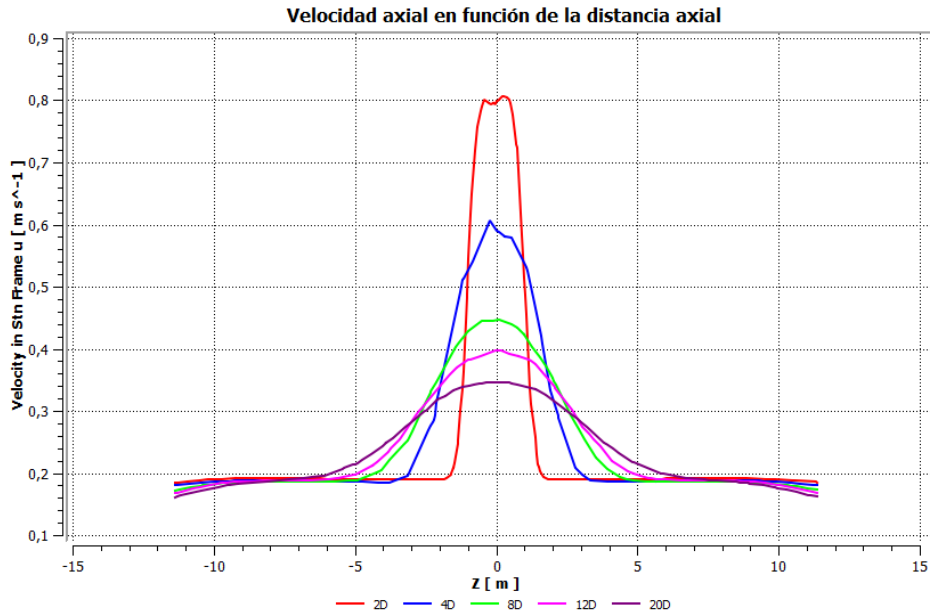


Figura 46: Velocidad axial en función de la distancia

En la figura se observa de forma bastante clara el comportamiento del fluido que ya se ha explicado anteriormente. Cuanto menor es la distancia respecto del agitador, mayor es la velocidad. Para la distancia 2D, que correspondería a 5 metros, se observa que se alcanza una velocidad de 0,8 m/s.

A medida que nos vamos alejando del agitador, aparte de que la velocidad máxima se reduce, el efecto del agitador sobre la velocidad se hace presente a una mayor anchura. Esto se debe a que, como ya se ha comentado, el flujo se expande con un determinado ángulo.

La distribución de la velocidad es simétrica, sin embargo se puede observar que en las distancias más próximas al agitador (2D y 4D en este caso) la simetría no es perfecta, debido a que el flujo no está todavía estabilizado completamente.

Se observa también que la velocidad de la zona que no se encuentra afectada directamente por el flujo del agitador es inferior a los 0,2 m/s que se tienen inicialmente de velocidad aguas arriba del agitador, y además es ligeramente más pequeña a medida que nos vamos alejando más.

Para terminar de analizar la velocidad axial del flujo, en la siguiente imagen se muestra la representación de la velocidad axial en función de la distancia, pero a diferencia de la figura 46, donde únicamente se representaba la velocidad en la altura del eje de rotación ($Y=0$), en la figura 47 se representa mediante planos para poder observar mejor la velocidad en secciones a distintas distancias.

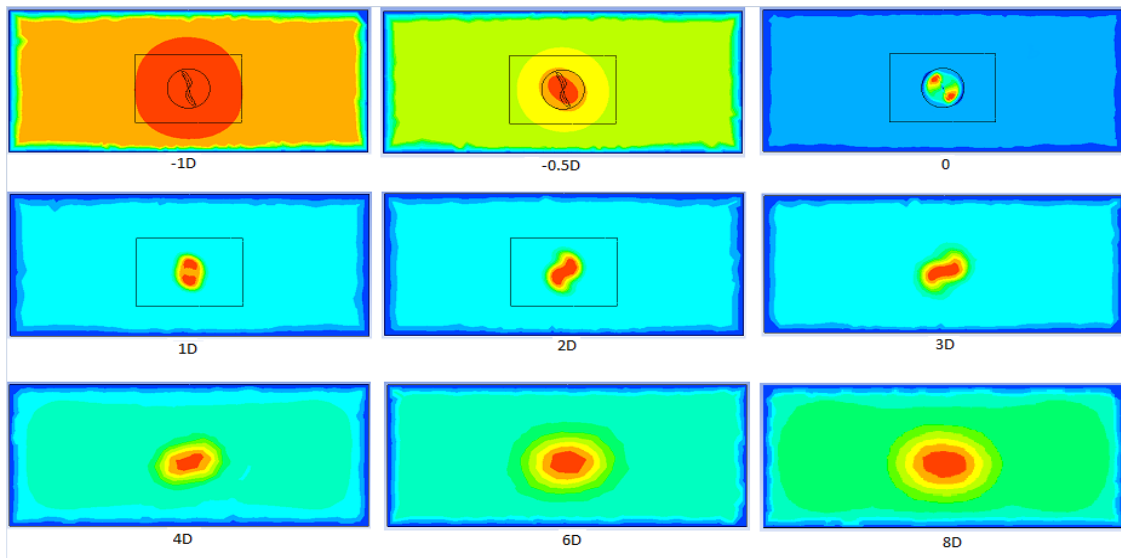


Figura 47: Velocidad axial en función de la distancia

En la figura anterior se observa claramente cómo en la parte de succión el flujo es atraído por el agitador y una vez sale del mismo éste se expande progresivamente mientras va perdiendo velocidad. También se observa cómo se va estabilizando el flujo a medida que aumenta la distancia.

Ahora se va a analizar la velocidad vertical del flujo.

Debido al movimiento giratorio del agitador, aunque el flujo sale empujado en dirección axial, ésta no es la única componente de velocidad que presenta. Por eso, también resulta interesante analizar cuál es la velocidad vertical del flujo para distintas distancias.

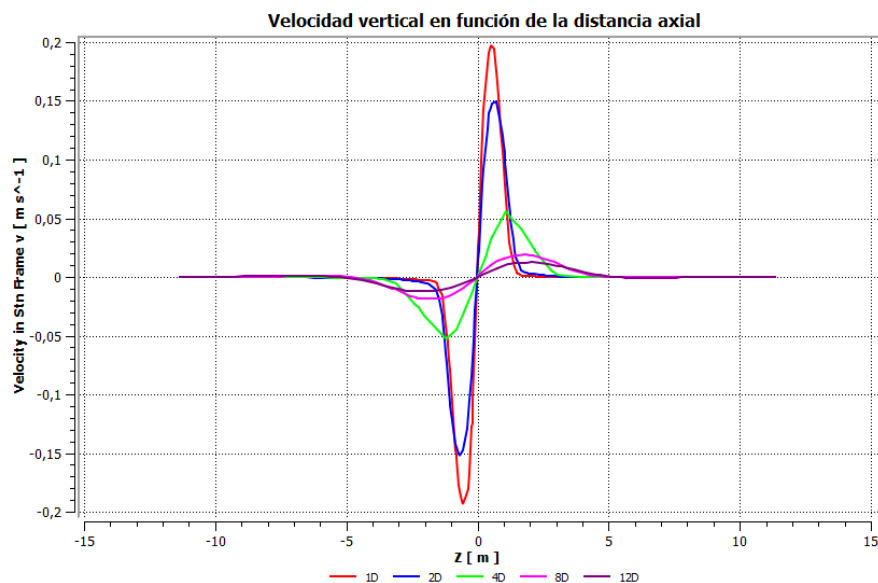


Figura 48: Velocidad vertical en función de la distancia

En la figura anterior se observa cómo evoluciona la velocidad vertical para distintas distancias respecto del agitador. En este caso la simetría es prácticamente perfecta incluso en aquellas zonas más próximas al agitador.

Se puede ver que la velocidad vertical es mayor cuanto más cerca se está del agitador y que esta velocidad se va atenuando progresivamente a medida que aumenta la distancia axial.

En este caso, la máxima velocidad vertical no se da sobre el eje de rotación sino que se produce a cierta distancia hacia cada uno de los lados. Esta distancia es menor cuanto más cerca nos encontramos. Debido al movimiento giratorio, la velocidad vertical es simétrica y toma los mismos valores a ambos lados del eje de rotación, pero en uno de los lados los valores son positivos y en el otro negativos.

La velocidad vertical en el centro del agitador es cero, como era de esperar por simetría.

A continuación se representa la velocidad del flujo en función de la distancia axial. Esta velocidad corresponde a la velocidad del fluido en el eje de rotación. De este modo, se puede observar cómo evoluciona la velocidad del flujo en todo su recorrido.

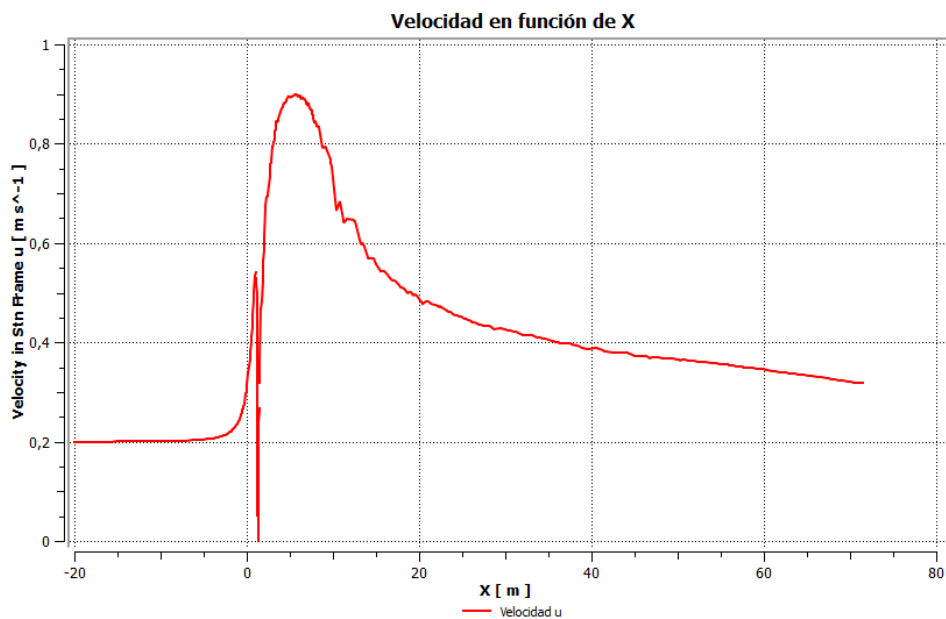


Figura 49: Velocidad axial en todo el recorrido del flujo

El flujo tiene una velocidad inicial de $0,2 \text{ m/s}$. Se puede observar cómo el flujo empieza a acelerarse cuando se encuentra aproximadamente a una distancia del agitador de 8 metros. La aceleración que experimenta el fluido es exponencial hasta alcanzar una velocidad máxima de $0,9 \text{ m/s}$. El pico hacia abajo se corresponde con la posición donde se encuentran los álabes del agitador.

A partir de este momento el flujo empieza a perder velocidad. Inicialmente la pierde

más rápidamente y el descenso se va suavizando a medida que esta disminuye. Ésta mayor desaceleración del flujo cuanto mayor es su velocidad se debe a una mayor diferencia de velocidad con el fluido que le rodea y, como se verá a continuación, a un mayor arrastre que se produce cuando la velocidad es mayor.

6.1.3. Efecto del diámetro y de la velocidad del agitador

Los resultados de velocidades obtenidos anteriormente corresponden a un agitador sumergible de 2500mm de diámetro funcionando a 34rpm. A pesar de que los resultados obtenidos ayudan a entender la estructura del flujo generado por un agitador, también resulta interesante analizar cómo afectan el diámetro y la velocidad de giro a la velocidad del flujo generado.

En las figuras 50 y 51 se representa la evolución de la velocidad a lo largo del eje de rotación, del mismo modo que se ha hecho en la figura 49, pero en este caso se comparan distintas velocidades y diámetros respectivamente.

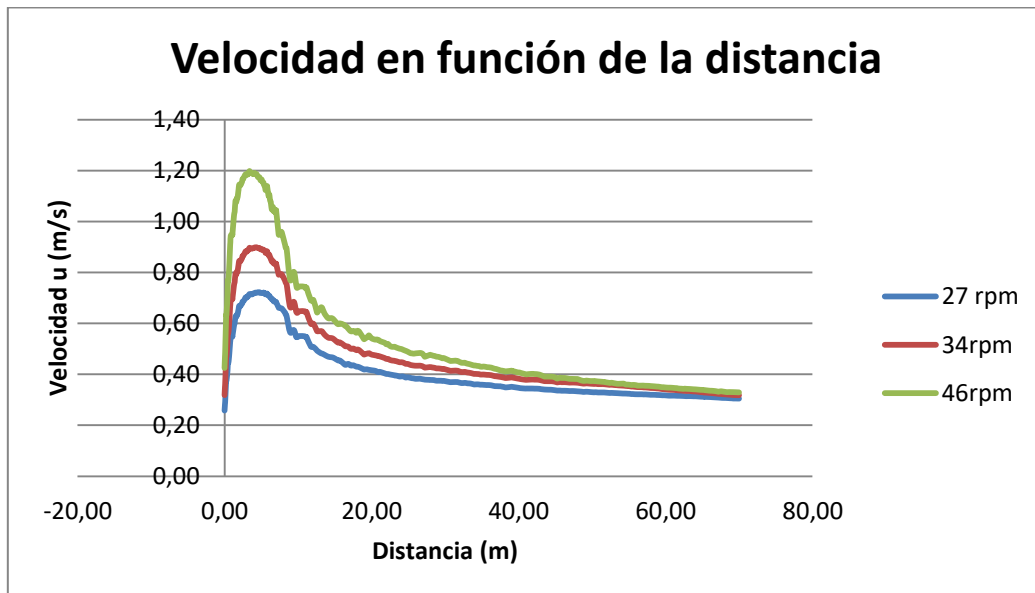


Figura 50: Comparación de la velocidad del flujo para distintas velocidad de giro (2500mm)

En la figura anterior se puede observar el efecto de la velocidad de giro del agitador sobre la velocidad del flujo. Cómo es lógico, a mayor velocidad de giro mayor velocidad alcanza el flujo.

Para la velocidad más baja, de 27rpm, se alcanza una velocidad axial máxima de algo más de 0,7m/s, mientras que para la velocidad de 46rpm la velocidad máxima es de 1,2m/s.

Teniendo en cuenta que el fluido ya tiene una velocidad inicial de 0,2m/s, el incremento de velocidad es del doble para unas condiciones de funcionamiento de 46rpm frente al incremento generado por el agitador a 27rpm.

Es también significativo el hecho de que la forma de las 3 curvas es muy similar, de manera que, aunque para mayores velocidades de giro se alcanzan mayores velocidades en el flujo, el alcance es parecido para las tres velocidades de giro analizadas. Resulta interesante, porque, como se verá a continuación esto no sucede de la misma manera para el caso de distintos diámetros.

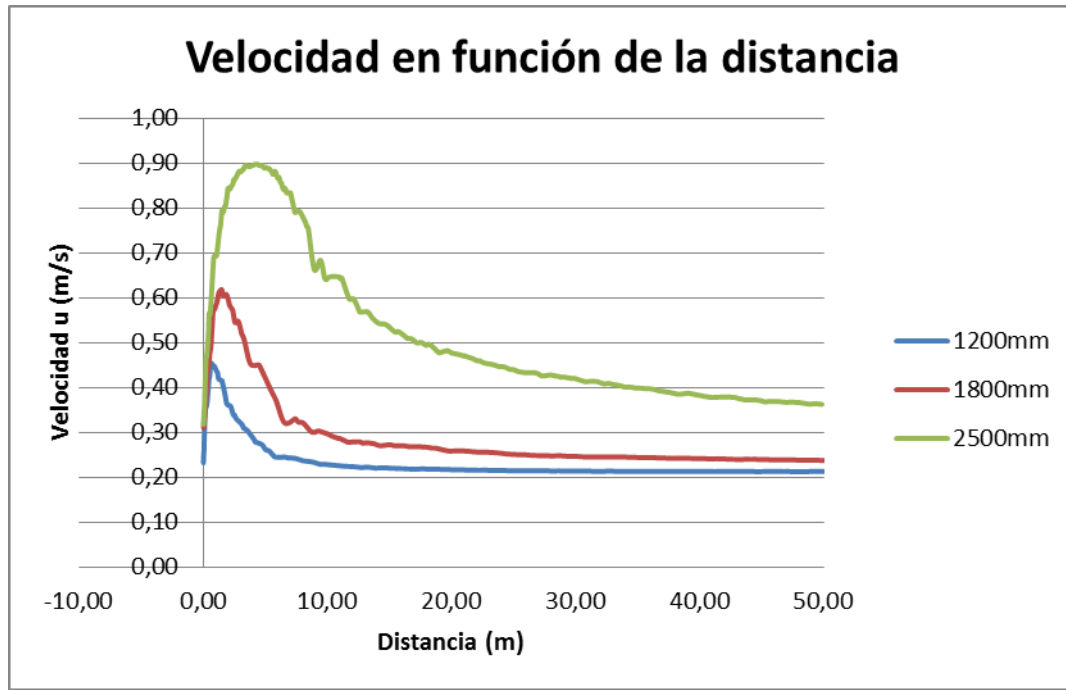


Figura 51: Comparación de la velocidad del flujo para distintos diámetros (34rpm)

En la figura anterior se puede ver una comparación de la influencia que tiene el diámetro sobre la velocidad que se alcanza en el flujo empujado.

Cómo se puede ver, un mayor diámetro provoca un incremento de la velocidad axial mayor, a pesar de que la velocidad de giro es la misma en todos los casos. La velocidad máxima en el caso de 2500mm de diámetro es de 0,9m/s mientras que para el de 1200mm de diámetro es de 0,45m/s aproximadamente.

Por lo tanto, el incremento de velocidad generado por el agitador grande es de 0,7m/s mientras que el del agitador pequeño apenas es de 0,25 m/s.

A diferencia de lo que se ha visto que sucede con la influencia de la velocidad de giro, las curvas de velocidad de cada uno de los diámetros están desplazadas unas respecto a las otras. De este modo, cuanto mayor es el diámetro de agitador, no solo se consiguen mayores velocidades, sino que además el alcance del flujo es considerablemente mayor.

6.1.4. Caudal volumétrico y arrastre

La energía que el agitador transmite al fluido se focaliza únicamente en una pequeña parte del caudal que es acelerado inicialmente. Sin embargo, lo que se pretende con su utilización es conseguir un movimiento en todo el fluido donde se encuentra sumergido.

Por este motivo, conocer cómo se produce el arrastre del caudal que envuelve al flujo generado es fundamental para comprender el comportamiento de un agitador.

En el caso estudiado, el caudal másico a la salida del agitador es de $2,726 \text{ m}^3/\text{s}$. Conocido este valor, se puede determinar el caudal arrastrado para cualquier distancia respecto del equipo con la expresión $Q - Q_0$, donde Q es el caudal del flujo a una determinada distancia del agitador y Q_0 es el caudal a la salida del mismo.

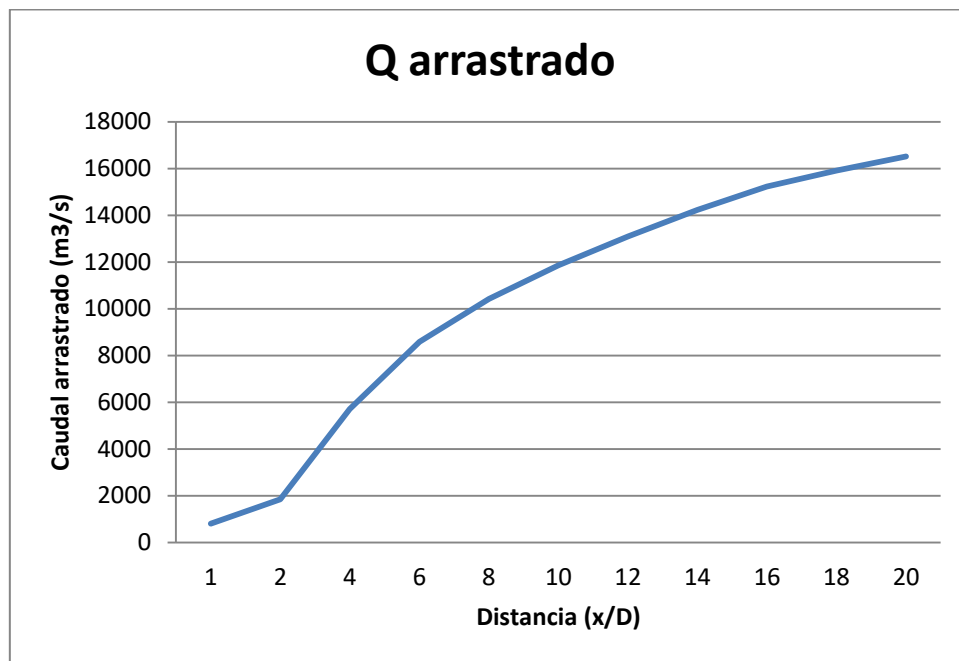


Figura 52: Caudal arrastrado

Se puede observar que hasta una distancia de dos veces el diámetro el caudal arrastrado es relativamente pequeño. Esto puede deberse a que el flujo que sale impulsado por el agitador, en un primer momento, se estrecha ligeramente, para posteriormente empezar a ensancharse a medida que va avanzando.

Se observa que el incremento del caudal arrastrado se va ralentizando a medida que aumenta la distancia.

En la siguiente imagen se observa una representación del caudal arrastrado, que permite entender de una forma visual el concepto del arrastre. La superficie verde es el

flujo que se va ensanchando y las líneas azules representan el fluido arrastrado que se une al flujo principal.

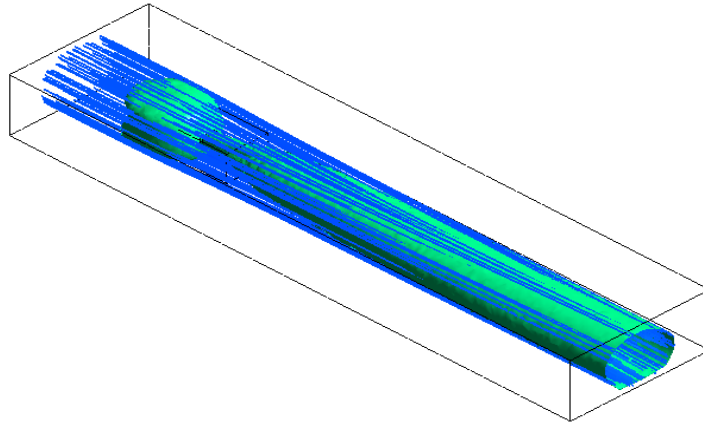


Figura 53: Representación visual del arrastre

Uno de los principios que debe cumplir el fenómeno del arrastre es el de la conservación de la cantidad de movimiento.

El agitador impulsa una determinada cantidad de masa de fluido a una determinada velocidad. La cantidad de movimiento se expresa como el producto de la masa por la velocidad, y en este caso, una vez el flujo ya ha salido del agitador, como no existe ninguna fuerza externa que añada energía al flujo, la cantidad de movimiento se tiene que conservar.

Hay que tener en cuenta que a medida que el flujo avanza, este arrastra al fluido de su alrededor, el cual ya tiene de por sí una velocidad de 0,2m/s. Por tanto, la cantidad de movimiento del flujo irá aumentando a medida que vaya arrastrando más caudal.

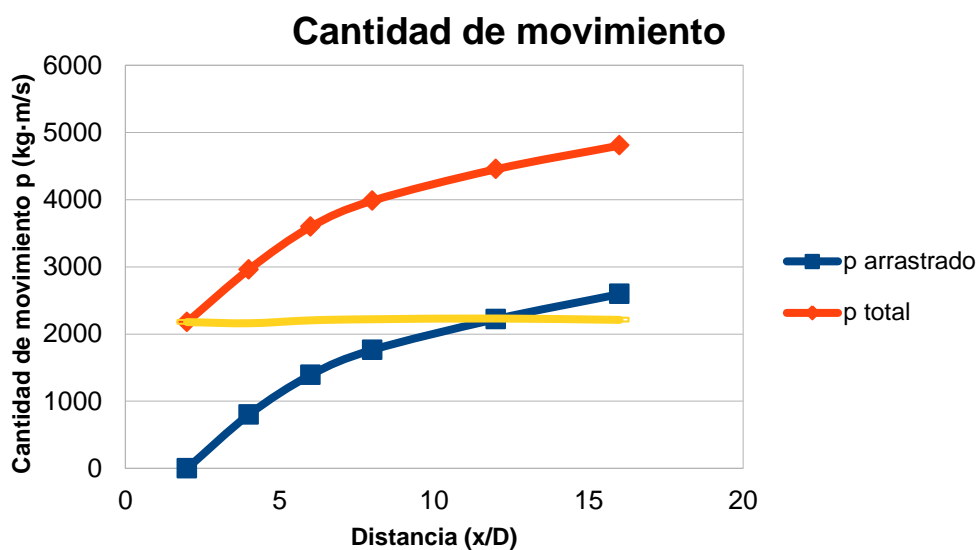


Figura 54: Conservación de la cantidad de movimiento

En la gráfica anterior se representa, en función de la distancia, la cantidad de movimiento total del flujo, la cantidad de movimiento del fluido que ha sido arrastrado y la diferencia entre estos dos.

Cómo se puede observar en la gráfica, la cantidad de movimiento total va aumentando con la distancia en la misma proporción que la cantidad de movimiento del flujo que va siendo arrastrado. Por ese motivo, la diferencia entre la cantidad de movimiento total y la del flujo arrastrado permanece constante. De esta forma comprobamos que la cantidad de movimiento no varía.

6.1.5. Ángulo de expansión

Como ya se ha comentado, el flujo impulsado por el agitador se ensancha a medida que avanza. En esta propagación, el flujo arrastra parte del fluido que le rodea aumentando su caudal y perdiendo velocidad progresivamente.

Determinar el ángulo de propagación es importante porque de él depende la superficie que se verá afectada por la acción del agitador y esto permite saber en qué momento el flujo impulsado entrará en contacto con las paredes del tanque en que se encuentra.

Para determinar el ángulo de expansión del flujo, se ha representado para varias distancias axiales respecto del centro del agitador, el punto que delimita el flujo con el fluido que le rodea y que no se ha visto afectado. Para determinar este punto, se ha cogido el valor del eje Z en el que la velocidad pasa a ser 0,21 m/s, teniendo en cuenta que la velocidad inicial es de 0,2 m/s.

Como se observa en la figura 45, este punto se situaría en la línea de distribución de velocidad más externa de todas las que salen del agitador.

En la siguiente imagen se representan estos puntos para distintas distancias:

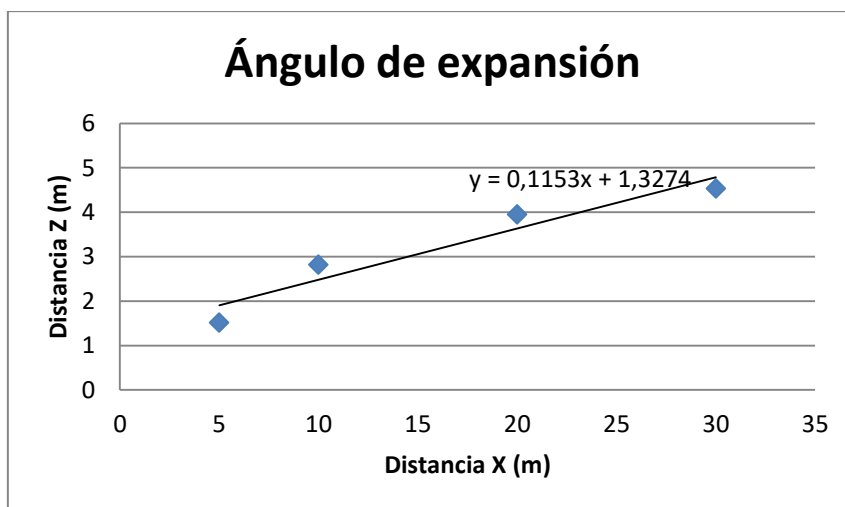


Figura 55: Cálculo del ángulo de expansión

Haciendo una regresión lineal, se obtiene que la pendiente de la recta es 0,115. A partir de ahí, podemos obtener el ángulo de propagación con la siguiente expresión:

$$\tan(\alpha) = 0,115 \rightarrow \text{ángulo} = 6,6^\circ.$$

Hay que tener en cuenta que este valor del ángulo de expansión se ha obtenido en un sistema en el que el flujo ya tiene una velocidad de 0,2m/s en la misma dirección en la que el agitador impulsa el flujo. En otro sistema como puede ser un tanque en el que no exista una circulación del flujo, es muy probable que este ángulo sea algo superior ya que parte del fluido circulará en la dirección opuesta, provocando una pérdida de velocidad más rápida en el fluido y un mayor ángulo de expansión.

6.1.6. Análisis del comportamiento del flujo en el agitador

En este apartado se va a analizar cómo se comporta el flujo en la zona más próxima, ya que es la zona donde, obviamente, el flujo sufre mayores cambios, debido a la fuerza que ejerce el agitador sobre el mismo.

De este modo, se analizará tanto la dinámica del flujo cuando se aproxima al agitador, como la forma en la que sale el flujo una vez ya ha sido acelerado por el movimiento de los álabes.

En la figura 56 se puede observar la acción que realiza el agitador sobre el fluido. A la derecha se encuentra la zona de succión y a la izquierda el flujo impulsado.

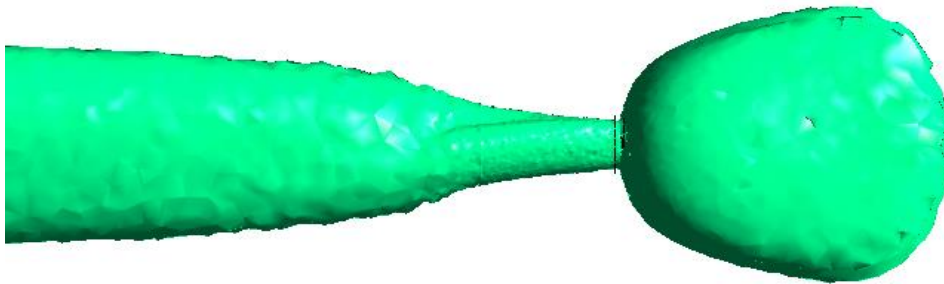


Figura 56: Zona de succión y empuje del agitador

En la imagen anterior se ha representado todo el volumen de fluido que tiene una velocidad mayor que 0,2m/s, siendo ésta la velocidad inicial. De este modo, todo el volumen verde de la figura 56 representa el fluido que se ha visto afectado por el agitador y ha aumentado su velocidad.

Se puede observar que el equipo succiona un volumen grande de fluido y lo impulsa hacia delante formando un chorro con una mayor velocidad. En la siguiente imagen se

muestra la distribución de vectores de velocidad:

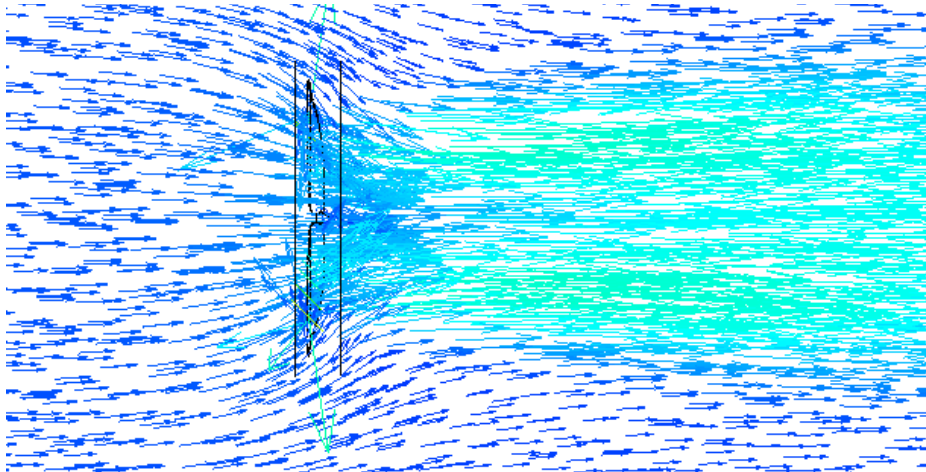


Figura 57: Distribución de vectores de velocidad

En la imagen anterior se observa como el agitador absorbe el flujo por la zona de succión (parte izquierda en este caso) y cómo lo lanza por el otro extremo a mayor velocidad.

En la figura 58 se representa gráficamente la velocidad del flujo en la zona de succión y de impulsión.

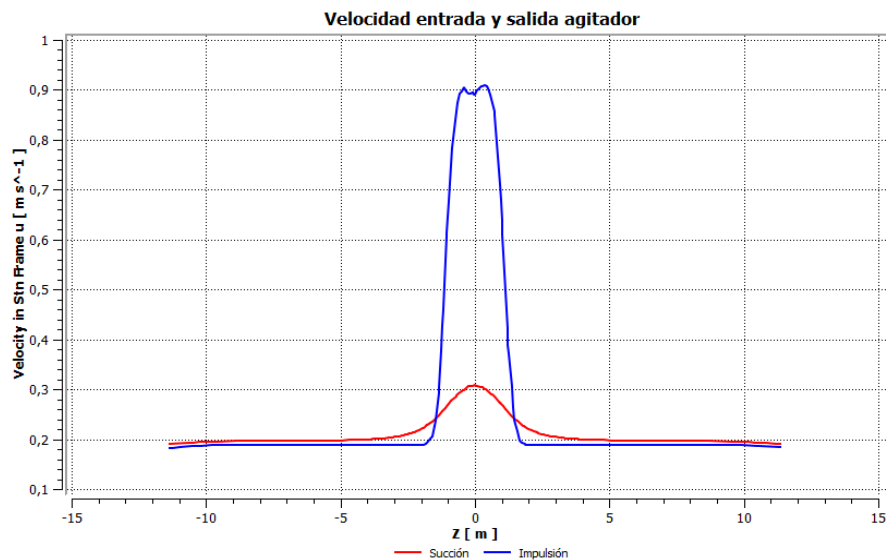


Figura 58: Velocidad a la entrada y salida del agitador

Como se puede observar en el gráfico anterior, la velocidad en la zona de impulsión es mucho mayor. La velocidad en la zona de impulsión se ha cogido a 5 metros del agitador para que el flujo ya esté estabilizado, mientras que en la zona de succión se ha tomado a una distancia de 1,25 metros.

En la zona succión la velocidad llega a 0,3m/s teniendo en cuenta que la medida ha sido tomada a 1,25 metros del agitador. Cuanto más cerca se tome la medida mayor será el pico de velocidad que se alcance.

A continuación, se van a analizar las características del flujo, tanto la velocidad como la presión, cuando éste se encuentra en contacto con los álabes. De este modo se analizarán los gradientes de velocidad y de presión que se crean entre las caras de los álabes.

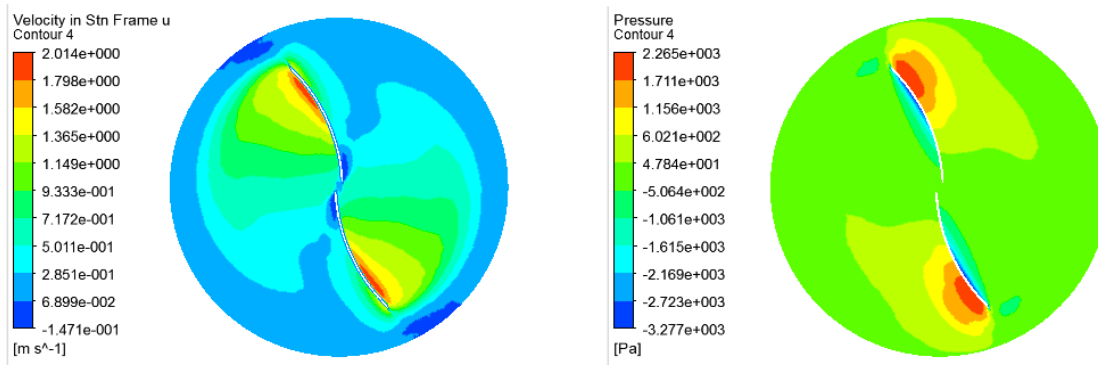


Figura 59: Velocidad y presiones en el agitador

Para poder analizar tanto las velocidades como las presiones a partir de las imágenes anteriores, hay que tener en cuenta que los álabes giran a derechas, es decir, en el sentido de las agujas del reloj.

Por lo que se refiere a las velocidades, se observa que la máxima velocidad se produce en la cara posterior de los álabes. La velocidad descende progresivamente desde la cara posterior de un álabe hacia la cara anterior del otro. En la cara anterior se observa también un ligero aumento de velocidad en la parte más cercana a la punta del álabe. En la parte más próxima al eje de rotación del agitador podemos considerar que la velocidad es nula.

Por lo que se refiere a las presiones, su comportamiento es el opuesto al de las velocidades. Las mayores presiones se encuentran en la cara frontal de los álabes, que es la cara que empuja el fluido y por lo tanto es lógico que las presiones más grandes se encuentren ahí. La máxima presión se encuentra en la parte superior de la cara frontal de los álabes debido a que la velocidad lineal de la parte superior es mayor. La presión que se alcanza es de 2000 Pa.

Desde la cara frontal, la presión descende progresivamente hacia la cara posterior del otro álabe, donde se encuentran las presiones más pequeñas. La cara posterior de los álabes tiene presiones negativas.

6.1.7. Análisis del efecto de la profundidad en la instalación del agitador

Como ya se ha comentado, las principales funciones que realiza un agitador sumergible son homogeneizar el fluido y las partículas que en él se encuentran, y evitar que éstas se depositen en el fondo.

Para evitar que las partículas se depositen en el fondo de las balsas, un factor determinante es la profundidad a la que se instala el equipo, ya que de ello dependerá que el flujo que lanza el agitador llegue al fondo y, así mismo, determinará la velocidad a la que lo haga.

Para estudiarlo, se ha simulado el sistema anterior colocando el agitador a una profundidad media (el eje de rotación situado a 4,25 metros sobre el fondo) y en el segundo caso se ha colocado a mayor profundidad (el eje de rotación a 2,25 metros sobre el fondo).

A continuación, se muestra la distribución de las velocidades para ambos casos:

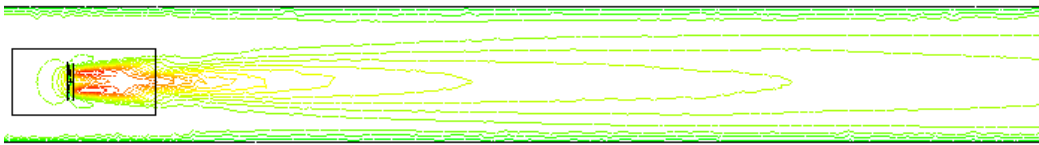


Figura 60: Distribución de velocidades a media profundidad

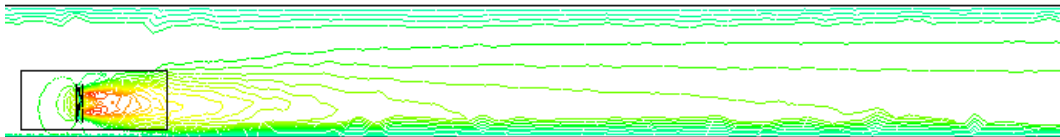


Figura 61: Distribución de velocidad a gran profundidad

Comparando las figura 60 y la figura 61 se puede observar que la forma básica de ambas distribuciones de velocidades es similar, sin embargo, como es lógico en el caso en el que el agitador se instala a una mayor profundidad, se produce un perfil con mayores velocidades en el fondo de la piscina, en detrimento de una menor velocidad en la zona superior.

Es evidente la importancia de colocar a una profundidad adecuada el agitador para conseguir los resultados deseados. En el caso en que la cantidad de partículas sea grande y ésta se pueda depositar con facilidad en el fondo, habrá que colocar el agitador a una mayor profundidad para conseguir mayores velocidades en el fondo del tanque y evitar que esto suceda.

6.2. Análisis del agitador

En el apartado anterior se han estudiado las características del flujo generado por el equipo, para conocer cómo es el flujo generado, las velocidades y el alcance del flujo, y como afectan las características del agitador en el flujo.

En este apartado se analizarán las características del propio agitador sumergible para conocer cuáles son sus parámetros de funcionamiento y estudiar detalladamente parámetros como el empuje o la eficiencia, que son de vital importancia para determinar el agitador más adecuado para una aplicación en concreto.

6.2.1. Empuje o *thrust*

El empuje es el parámetro más relevante de un agitador sumergible y es el parámetro de desempeño que suelen ofrecer los fabricantes.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del empuje para distintos tamaños de agitador y distintas velocidades de giro. Como se ha comentado anteriormente en el apartado “4.5. Empuje”, se calcula el empuje tanto de forma directa, con el resultado que nos indica el programa, como de forma analítica mediante el incremento de velocidad que el agitador proporciona al flujo.

Diámetro (mm)	Vel. de giro (rpm)	Empuje (N)	Empuje analítico (N)	Error (%)
1200	34	101	96	4,9
1200	59	307	338	10,1
1800	34	541	437	19,2
2500	27	1343	1340	0,2
2500	34	2164	2100	2,9
2500	46	4073	3800	6,7

Tabla 11: Empuje para distintos tamaños y velocidades de giro

En la tabla anterior se muestra el empuje obtenido para distintos tamaños de agitador y distintas velocidades de giro. Se puede observar que el empuje aumenta tanto con la velocidad de giro como con el tamaño.

Se observa que los resultados obtenidos para el empuje medido por el programa y el empuje calculado analíticamente son bastante parecidos, salvo en el caso del agitador de 1800mm de diámetro donde el error que se ha obtenido es algo mayor (cercano al 20%).

En la siguiente imagen se muestra una vista lateral de la simulación realizada para medir el empuje siguiendo la norma ISO 21630.

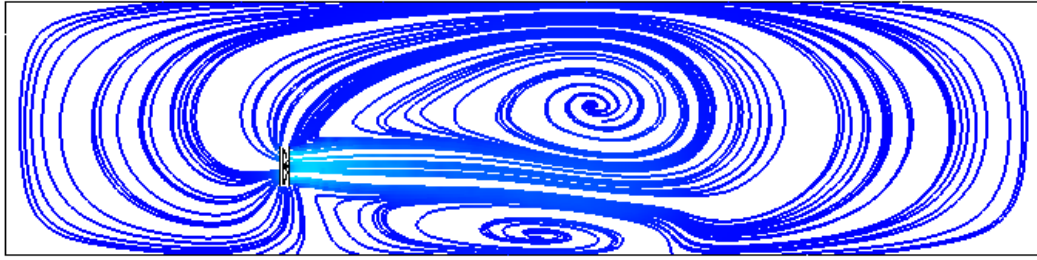


Figura 62: Simulación del ensayo para calcular el empuje

Se puede observar en la figura cómo el movimiento que describe el fluido es muy similar al de la figura 22 donde se esquematiza el ensayo realizado por la empresa FAGGIOLATI PUMPS para medir el empuje de sus agitadores.

Para poder analizar mejor cómo afecta la velocidad de giro y el tamaño, en las siguientes gráficas se representa la evolución del empuje cuando cambia la velocidad y cuando cambia el diámetro del agitador.

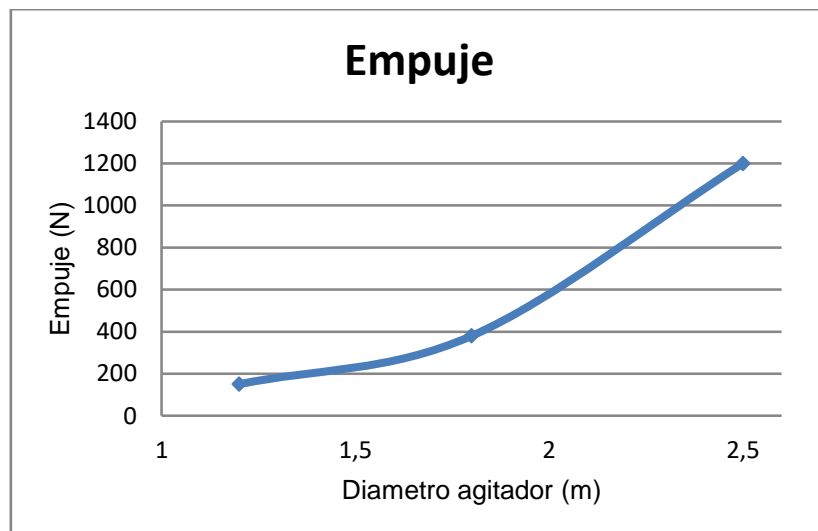


Figura 63: Evolución del empuje con el diámetro del agitador

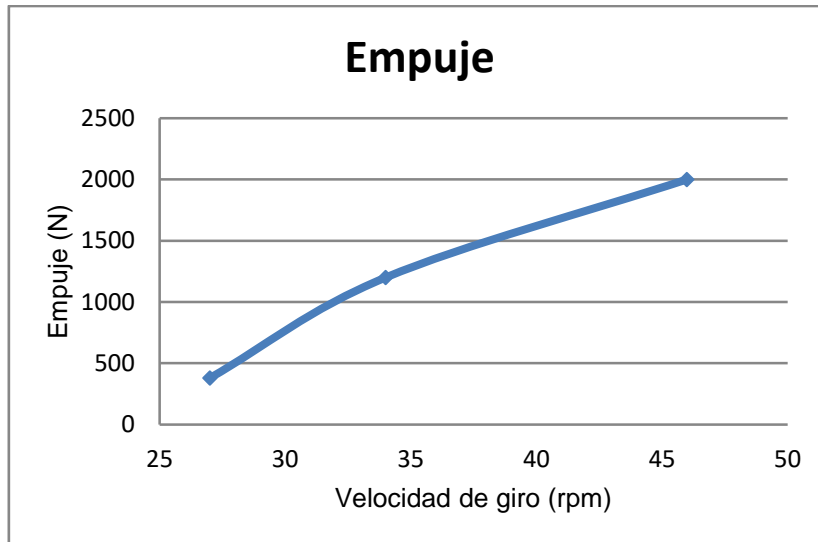


Figura 64: Evolución del empuje con la velocidad de giro del agitador

En la figura 63 y 64 se puede observar como aumenta el empuje al aumentar tanto el diámetro como la velocidad de giro. El aumento del empuje con el incremento de la velocidad de giro sigue una evolución que podemos considerar lineal, mientras que el aumento del diámetro provoca un crecimiento cuadrático.

Esto puede indicarnos que el empuje de un agitador sumergible depende de la velocidad de giro y de su superficie y, por tanto, del cuadrado de su diámetro.

6.2.2. Parámetros adimensionales

Como se ha comentado en la sección “6.2.2. Parámetros adimensionales”, algunos de los parámetros más usados de un agitador sumergible son el número de flujo (*flow number*), el número de empuje (*thrust number*) y el número de potencia (*power number*). Se trata de tres parámetros adimensionales que nos ayudan a entender el funcionamiento de un agitador.

Se han calculado estos tres números para distintas velocidades y tamaños de agitador y se han obtenido los siguientes resultados:

Velocidad (rpm)	Diámetro (m)	Empuje (N)	Caudal (m ³ /s)	Potencia (kW)	Fl	Th	Po
59	1,2	307	0,564	1,27	0,33	0,15	0,54
34	1,8	541	1,016	1,27	0,31	0,16	0,37
27	2,5	1343	2,523	1,27	0,36	0,17	0,14
34	2,5	2164	2,995	2,54	0,34	0,17	0,14
46	2,5	4073	3,795	6,41	0,32	0,18	0,15

Tabla 12: Número de empuje y número de flujo

Los valores obtenidos son pequeños si los comparamos con los que se suelen obtener en agitadores más compactos. En este sentido, lo más significativo es el hecho de que el número de potencia es mucho más pequeño, lo que se puede asociar a la mayor eficiencia que tienen este tipo de agitadores sumergibles de gran tamaño.

También se observa claramente cómo a medida que aumenta el diámetro del agitador el número de potencia se va haciendo cada vez más pequeño. Como analizaremos más adelante, un mayor diámetro se asocia a una mayor eficiencia en términos de ratio empuje-potencia.

A partir de los parámetros adimensionales anteriores, se puede calcular el valor del parámetro c , que expresa la relación entre el número de flujo y el número de empuje. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Velocidad (rpm)	Diámetro (m)	Fl	Th	c	S
59	1,2	0,33	0,15	0,85	1,11
34	1,8	0,31	0,16	0,77	0,73
27	2,5	0,36	0,17	0,87	0,26
34	2,5	0,34	0,17	0,81	0,26
46	2,5	0,32	0,18	0,75	0,26

Tabla 13: Cálculo del parámetro c y el swirl number

Los valores obtenidos para el parámetro c son bastante razonables, teniendo en cuenta que, por ejemplo, para los agitadores sumergibles de baja velocidad de la marca *Flygt*, el valor del parámetro c suele ser aproximadamente de 0,84 (8).

En lo que se refiere al *swirl number* (S), los valores por debajo de 0,5 indican que la turbulencia en el flujo es débil/moderada, mientras que para valores superiores a 0,5 la turbulencia en el flujo es elevada (Dartmouth College).

En este caso, para los agitadores de mayor tamaño (2500mm de diámetro) se obtiene un *swirl number* de 0,26, lo que supone que la turbulencia del flujo generado es bastante débil. Sin embargo, para el caso de los agitadores de 1200 y 1800mm de diámetro se han obtenido valores de 1,11 y 0,73 respectivamente, lo que implica una turbulencia considerable en el flujo.

6.2.3. Eficiencia

La eficiencia es uno de los parámetros más significativos a la hora de seleccionar el agitador más adecuado para una determinada aplicación. En la siguiente tabla se muestran los valores de eficiencia obtenidos en función de las características del agitador:

Velocidad (rpm)	Diámetro (m)	Empuje (N)	Potencia (kW)	Eficiencia (N/kW)
59	1,2	307	1,27	241,73
34	1,8	541	1,27	425,98
27	2,5	1343	1,27	1057,48
34	2,5	2164	2,54	851,97
46	2,5	4073	6,41	635,41

Tabla 14: Valores de la eficiencia

Se ha calculado la eficiencia como la relación entre el empuje ejercido y la potencia eléctrica que consume el equipo. Los valores de eficiencia obtenidos son bastante comunes entre este tipo de agitadores sumergibles, donde la eficiencia alcanza valores de entre 450 y 1250 N/kW. Se trata de valores muy elevados si se comparan con los que se obtienen en agitadores tradicionales, la eficiencia de los cuales suele rondar los 200 N/kW.

A partir de la tabla anterior se puede apreciar que la eficiencia aumenta con el tamaño y disminuye con la velocidad de rotación del agitador. En la siguiente gráfica se representa la evolución de la eficiencia con la velocidad de giro, en este caso para un agitador de 2500mm de diámetro.

Eficiencia en función de la velocidad de giro

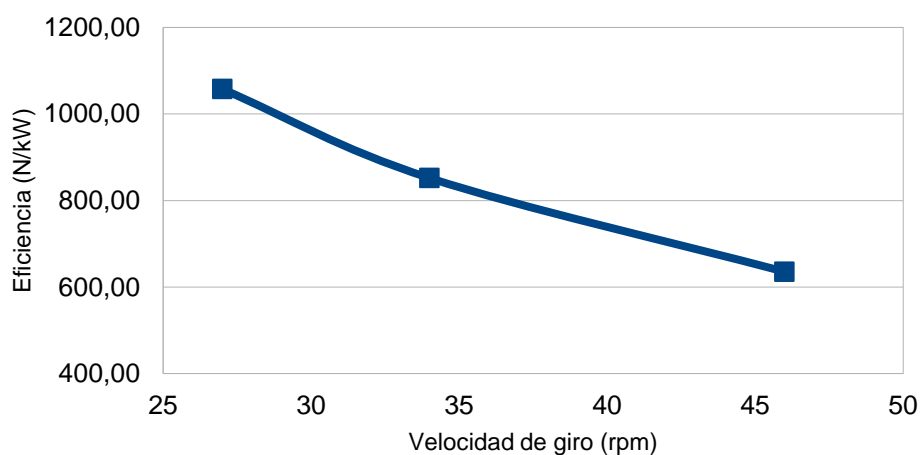


Figura 65: Evolución de la eficiencia con la velocidad de giro

Con los resultados obtenidos, lo más lógico será utilizar el agitador de mayor tamaño y de velocidad de giro más baja que permita cumplir con las necesidades de cada aplicación en concreto.

6.3. Simplificación de la geometría del agitador para facilitar el cálculo

Trabajar con la geometría original del agitador nos garantiza que los resultados que obtenemos en las simulaciones son los que mejor reflejan el comportamiento real del agitador.

Sin embargo, debido a la complejidad de la geometría de un agitador sumergible, existe la necesidad de consumir una enorme cantidad de nodos para poder mallar correctamente esta estructura y obtener unos resultados adecuados.

Esta enorme cantidad de nodos necesarios para mallar la superficie del agitador hace que se precise una gran potencia de cálculo, por lo que calcular los resultados requiere grandes cantidades de tiempo.

Por este motivo, resulta de gran utilidad poder sustituir la geometría original del agitador por otra geometría más simple, pero que transmita un empuje al fluido lo más parecido posible al que transmite el equipo original.

Para ello, se sustituirá el agitador por un volumen cilíndrico con un tamaño similar al que pretende reemplazar. Este volumen cilíndrico transmitirá un momento lineal al fluido con el objetivo de que a la salida de este volumen la velocidad sea igual a la velocidad a la salida del agitador.

A continuación se muestra la velocidad del flujo a la salida del agitador en sus tres componentes:

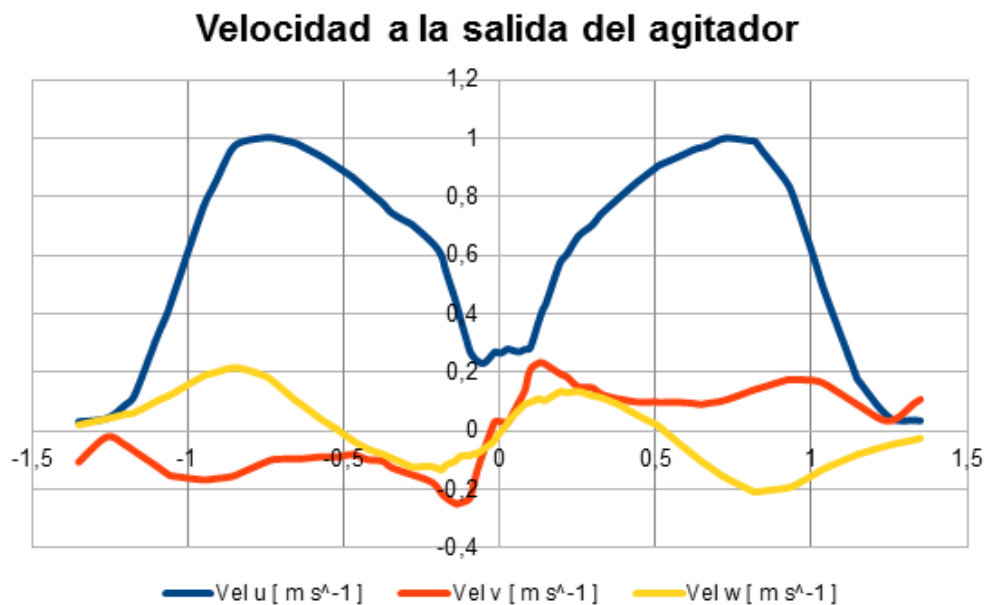


Figura 66: Velocidad a la salida del agitador

Para poder replicar esta velocidad de salida, se han ajustado las rectas anteriores de forma que posteriormente se pueda definir el momento lineal en cada una de las tres componentes en función de la distancia al eje central del volumen cilíndrico.

Para ello, se ha realizado un ajuste de las curvas anteriores de velocidad en las tres componentes. El ajuste que se ha realizado ha sido polinómico, de manera que con estas curvas ajustadas se obtiene el comportamiento del agitador. Las curvas que describen el comportamiento de la velocidad en las tres componentes tienen la siguiente forma:

$$vel_u = 1,343 \cdot d^6 - 5,349 \cdot 10^{-3} \cdot d^5 - 4,303 \cdot d^4 + 2,124 \cdot 10^{-2} \cdot d^3 + 3,216 \cdot d^2 - 1,574 \cdot 10^{-2} \cdot d + 3,515 \cdot 10^{-1}$$

$$vel_v = 1,611 \cdot 10^{-1} \cdot d^5 - 5,611 \cdot 10^{-5} \cdot d^4 - 4,859 \cdot 10^{-1} \cdot d^3 + 4,605 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 + 4,310 \cdot 10^{-1} \cdot d - 3,739 \cdot 10^{-3}$$

$$vel_w = -7,664 \cdot 10^{-1} \cdot d^7 - 1,056 \cdot 10^{-2} \cdot d^6 + 2,707 \cdot d^5 + 1,968 \cdot 10^{-2} \cdot d^4 - 2,734 \cdot d^3 - 8,033 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 + 5,974 \cdot 10^{-1} \cdot d + 6,946 \cdot 10^{-4}$$

siendo d la distancia al eje central del volumen cilíndrico.

Las ecuaciones anteriores describen el comportamiento del perfil de velocidad a la salida del agitador. Sin embargo, para conseguir que a la salida del cilindro la velocidad sea la misma que a la salida del agitador al que sustituye, el cilindro tiene que aportar al flujo un determinado momento lineal. Este momento lineal que aporta el cilindro será constante desde la entrada hasta la salida del mismo y será el que provocará el incremento en la velocidad del flujo.

Por lo tanto, el momento lineal del cilindro en cada una de las tres coordenadas tendrá la forma de las ecuaciones anteriores referidas a la velocidad en cada una de sus tres componentes, multiplicado por un determinado coeficiente que es el que hará que el valor de la velocidad a la salida sea uno u otro en función de las características del agitador que se quiera reemplazar.

Este coeficiente se ha calculado en función del empuje del agitador. Hay que tener en cuenta que como el momento lineal se aplica de forma constante en todo el volumen, el valor del momento dependerá del volumen del cilindro utilizado como sustituto.

$$1,45 \cdot \frac{F_e}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot l}$$

donde F_e es la fuerza de empuje del agitador, D es el diámetro del cilindro y l la longitud del cilindro.

El momento lineal en cada dirección sería el producto del factor anterior por el

comportamiento de la velocidad en esa componente:

$$p_x = \text{Factor} \cdot \text{vel}_u; \quad p_y = \text{Factor} \cdot \text{vel}_v; \quad p_z = \text{Factor} \cdot \text{vel}_w;$$

En la siguiente figura se muestra el perfil de velocidades del mismo agitador que en la figura anterior, pero sustituido por un cilindro que aporta el momento según las ecuaciones anteriores.

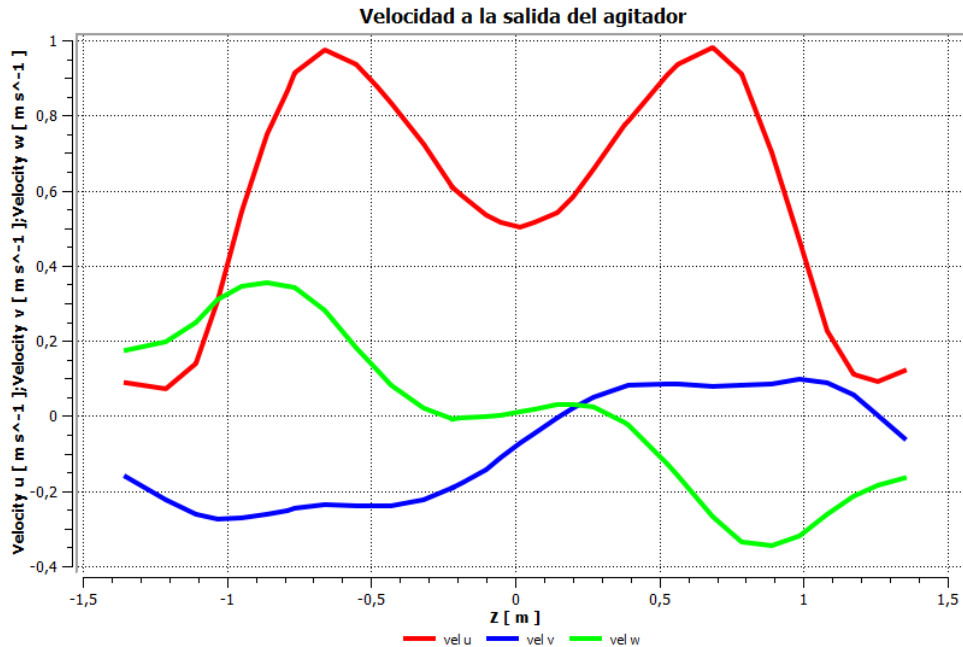


Figura 67: Velocidad a la salida del cilindro

Se puede observar cómo el perfil de velocidades obtenido para las tres componentes de la velocidad es similar al que se obtiene con el agitador original. De este modo, podremos trabajar con este nuevo volumen reduciendo los tiempos de cálculo y facilitando la tarea de optimización.

En la siguiente imagen se observa una comparación del perfil de velocidades obtenido con un agitador (arriba) y el perfil de velocidades obtenido simplificando el agitador por un volumen cilíndrico que acelera el fluido (abajo).

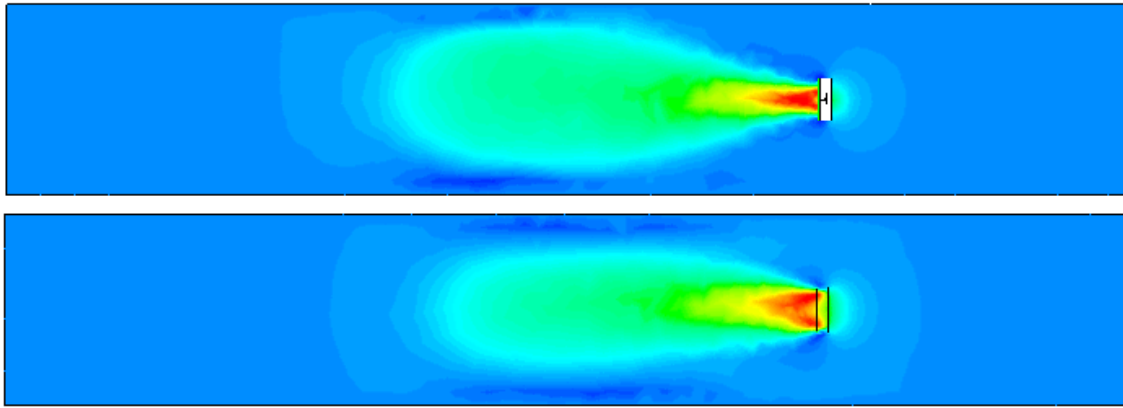


Figura 68: Comparación perfil de velocidades de un agitador y su simplificación

En la imagen anterior se observa claramente cómo tanto la estructura del flujo generado como el alcance son muy similares para el caso del agitador, así como para el volumen cilíndrico que lo reemplaza.

Con esta simplificación se consigue reducir el número de elementos y nodos de la malla a menos de la mitad. A modo de ejemplo orientativo, en la siguiente tabla se muestra la reducción en elementos y nodos de la malla que se consigue para el caso del tanque de recirculación que se analiza en el siguiente apartado.

Tanque de recirculación	
Mallado original	Mallado simplificado
<ul style="list-style-type: none"> • 397.936 elementos • 75.187 nodos 	<ul style="list-style-type: none"> • 141.010 elementos • 31.698 nodos

Tabla 15: Comparación de elementos de la malla

6.4. Optimización del posicionamiento de agitadores sumergibles

En esta sección se van a analizar algunas de las situaciones más típicas en las que se utilizan los agitadores sumergibles dentro de una EDAR.

Se analizará para cada caso cómo es el movimiento del fluido y se analizarán distintas configuraciones en el posicionamiento de los agitadores para ver cuáles permiten conseguir las condiciones de agitación deseadas minimizando al máximo el consumo energético.

6.4.1. Tanque rectangular

En este tipo de balsas es habitual colocar un agitador en una de las esquinas. En la imagen siguiente se muestran las velocidades del fluido en toda la piscina y la dirección que sigue el flujo.

En este caso se ha utilizado un agitador de 2500mm de diámetro y una velocidad de giro de 46rpm. La piscina tiene unas dimensiones de 25m x 15m x 6m.

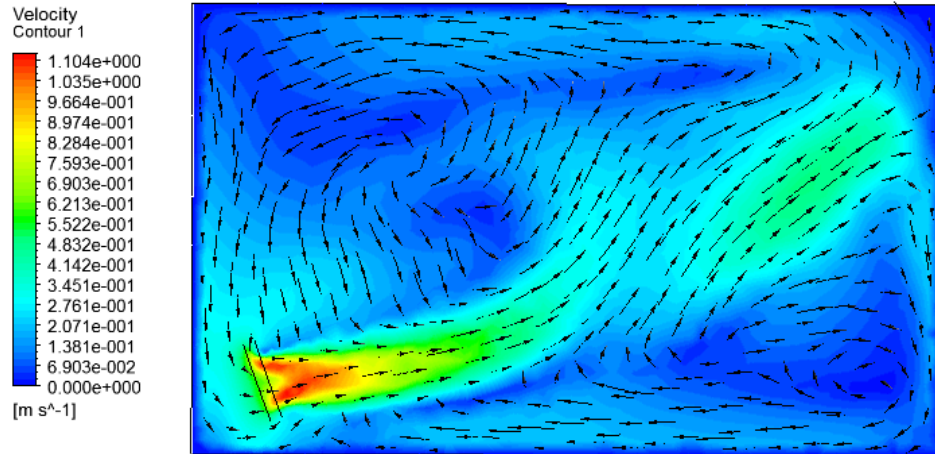


Figura 69: Distribución de velocidades en tanque rectangular

En la figura anterior se observa cómo el flujo que impulsa el agitador avanza aproximadamente en la dirección del eje de rotación hasta que choca con la pared opuesta de la piscina.

Cuando el flujo choca contra la pared podemos decir que se bifurca y vuelve hacia el agitador por ambos lados de lo que sería el flujo original impulsado.

El flujo que vuelve por la pared (parte inferior de la figura) es arrastrado de nuevo por el flujo impulsado. Del flujo que regresa por la pared opuesta (parte superior de la figura) una parte es arrastrado por el flujo del agitador y otra llega a la parte de succión donde es impulsado nuevamente.

En la zona central donde se cruzan el flujo lanzado por el agitador y el flujo que vuelve, se forma un remolino. Lo mismo sucede en la parte inferior derecha de la imagen correspondiente a una de las esquinas del tanque.

Como se ha comentado anteriormente en la sección “4.8. Velocidad para evitar sedimentaciones”, para evitar que se depositen sustancias en el fondo de las balsas hay que garantizar que en todo momento la velocidad del fluido sea mayor que 0,05m/s.

Para ello, en la siguiente figura se muestra la velocidad en un plano situado cerca del fondo de la piscina, en concreto a 0,5m sobre el fondo.

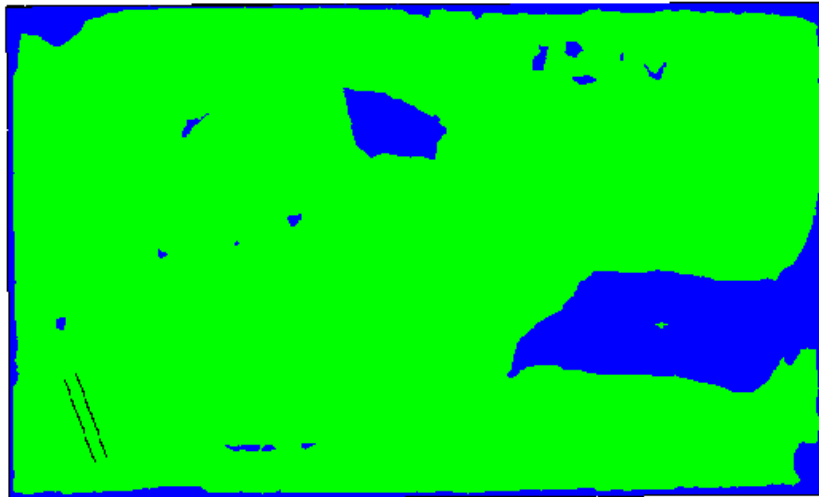


Figura 70: Velocidad en el fondo con un agitador en la esquina de 6,41kW

El color verde representa la zona donde la velocidad del fluido es mayor a los 0,05m/s necesarios para evitar que se formen sedimentaciones. Se observa que se crea una zona de baja velocidad en la pared opuesta al agitador, que se sitúa en la misma ubicación donde en la imagen anterior hemos visto que se forma un remolino.

Hay que tener en cuenta que la zona inmediatamente en contacto con la pared siempre aparecerá de color azul porque se ha establecido la condición de no deslizamiento en las paredes, y por lo tanto el fluido en contacto con la pared no tiene velocidad.

En la siguiente figura se muestran los mismos resultados colocando el agitador en otra posición.

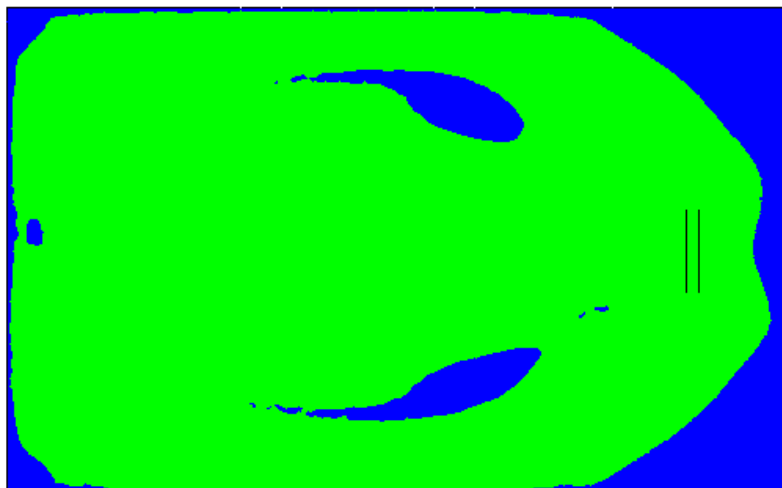


Figura 71: Velocidad en el fondo con un agitador centrado de 6,41kW

En esta figura se observa que colocar el agitador en el centro en lugar de una esquina

no es una buena alternativa, ya que se forman grandes zonas de baja velocidad situadas en las esquinas de la parte posterior del agitador.

A partir de los resultados anteriores lo más lógico sería quedarse con la disposición de un agitador en una de las esquinas. Otra opción sería utilizar dos agitadores colocados en dos esquinas contiguas. A continuación se muestra el resultado obtenido para esta disposición:

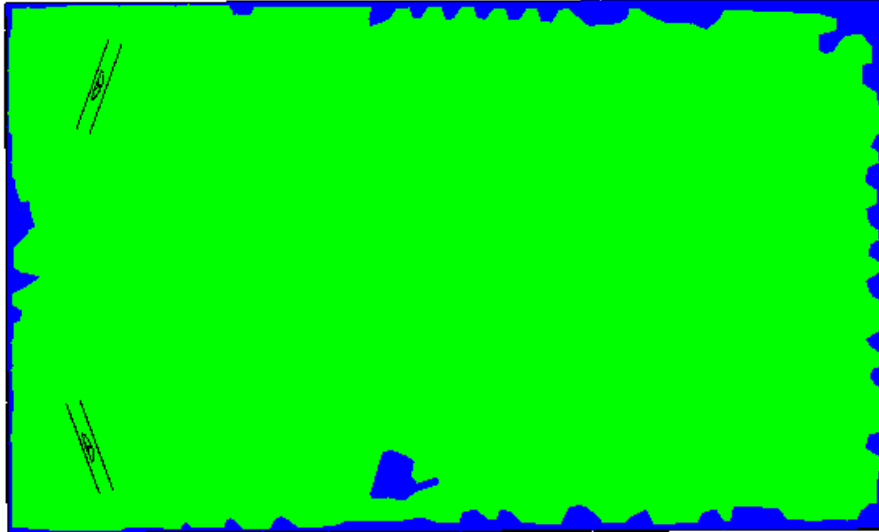


Figura 72: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW

A partir de la figura anterior queda claro que con dos agitadores sumergibles se puede conseguir agitar adecuadamente toda la piscina, por lo tanto sería la solución más conveniente. Hay que tener en cuenta que se están utilizando dos agitadores de 2500mm de diámetro girando a 27rpm los cuales tienen una potencia de 1,27kW cada uno. Con esta configuración se consigue una mejor agitación del tanque que utilizando un único agitador de 6,41kW y se consigue un importante ahorro energético.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para el tanque rectangular:

Tanque rectangular	
Dimensiones	25m x 15m x 6m
Agitadores instalados	2 de 1,27kW
Potencia total	2,54kW
Potencia/volumen	1,13W/m ³

Tabla 16: Resumen optimización tanque rectangular

6.4.2 Tanque de recirculación con aireación

En el tanque de recirculación el flujo da vueltas constantemente empujado por uno o varios agitadores sumergibles. En este caso, se ha empezado con una configuración típica para este tipo de situación que consiste en utilizar dos agitadores uno a cada lado del tanque. Se utilizan dos agitadores de 2500mm de diámetro y una velocidad de giro de 46rpm. El tanque de recirculación tiene unas dimensiones de 40m x 13m x 6,5m, con un muro central de un metro de ancho y 28 de largo.

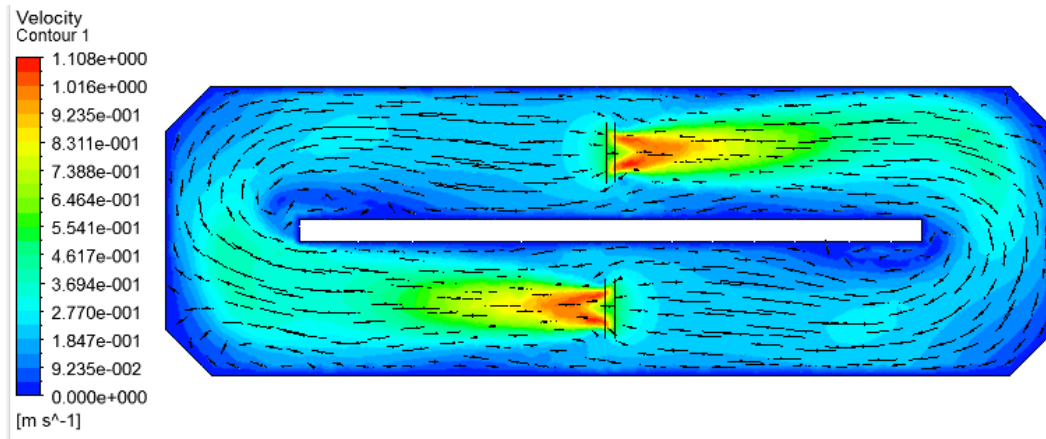


Figura 73: Distribución de velocidades en piscina rectangular de recirculación

En la figura anterior se observa claramente cómo el flujo da vueltas empujado por los agitadores. También se aprecia que se forma algún pequeño remolino en los giros en la parte más cerrada. A continuación, igual que en el caso anterior, se comprueba cuál es la velocidad del fluido cerca del fondo de la piscina para tratar de asegurar que alcanza los 0,05m/s.

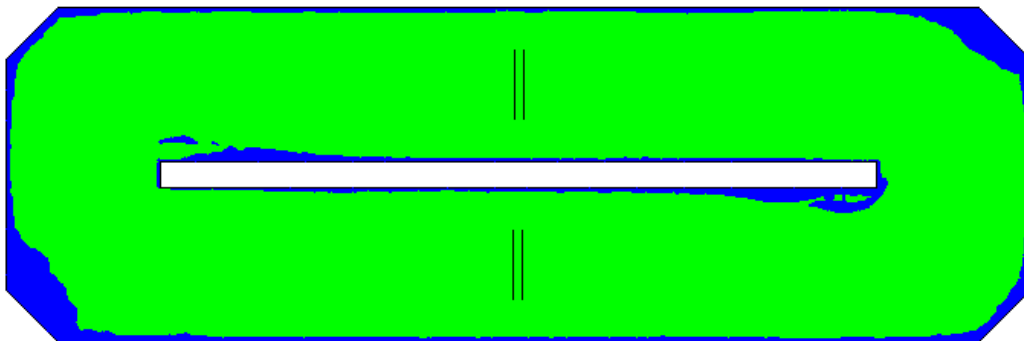


Figura 74: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 6,41kW

Se observa en la figura que prácticamente toda la superficie está correctamente agitada, a excepción de alguna esquina. Por lo tanto, podemos decir que ésta sería una alternativa con la que se conseguiría agitar correctamente todo el tanque. A continuación se prueba la opción de utilizar un único agitador:

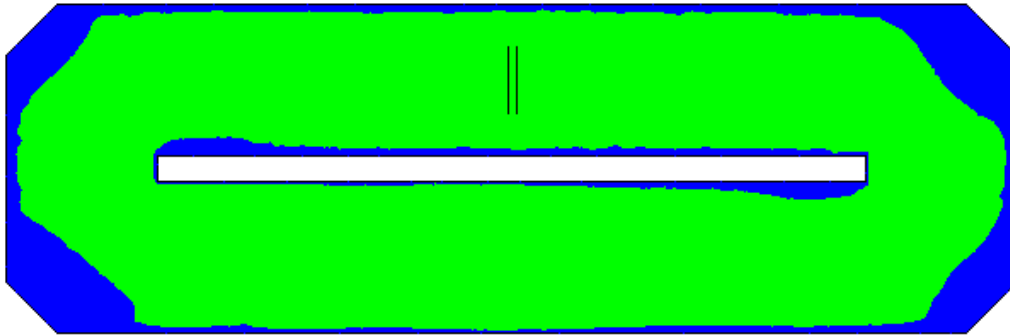


Figura 75: Velocidad en el fondo del tanque con un agitador de 6,41kW

En la imagen anterior se observa que casi toda la superficie está correctamente agitada, aunque las zonas donde la velocidad es insuficiente son más amplias que en el caso de dos agitadores. La diferencia no es muy grande por lo que es lógico pensar que con dos agitadores de 2500mm y girando a 46rpm el sistema está sobredimensionado.

Por ello, se va a analizar el tanque utilizando dos agitadores de 2500mm girando a 27rpm. Estos agitadores consumen 1,27kW cada uno mientras que los utilizados anteriormente consumen 6,41kW cada uno.

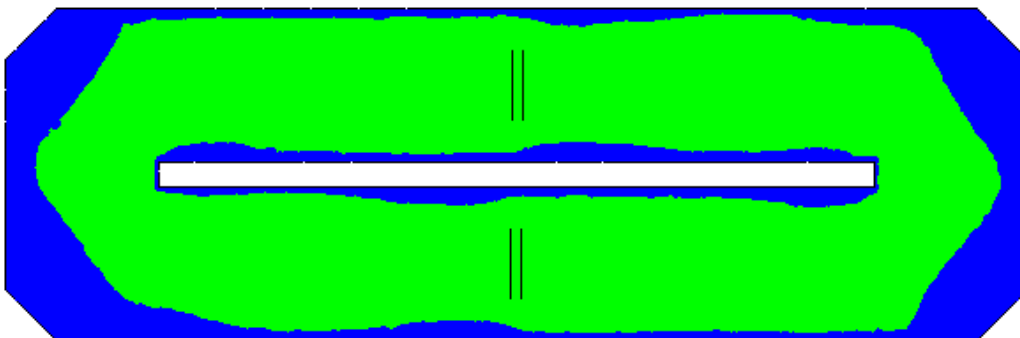


Figura 76: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW

Se observa en la figura anterior que la agitación conseguida es similar a la de utilizar un único agitador de 6,41kW. Sin embargo, la potencia consumida es menos de la mitad. Por lo tanto, es más óptimo utilizar dos agitadores separados de menor potencia que utilizar un único agitador de potencia mayor.

Por último se analizará una disposición de dos agitadores de 2500mm de diámetro girando a 34rpm cuya potencia es de 2,54kW. De este modo se comprobará si se consigue una agitación similar a la disposición de dos agitadores de 6,41kW, pero con el consiguiente ahorro energético.

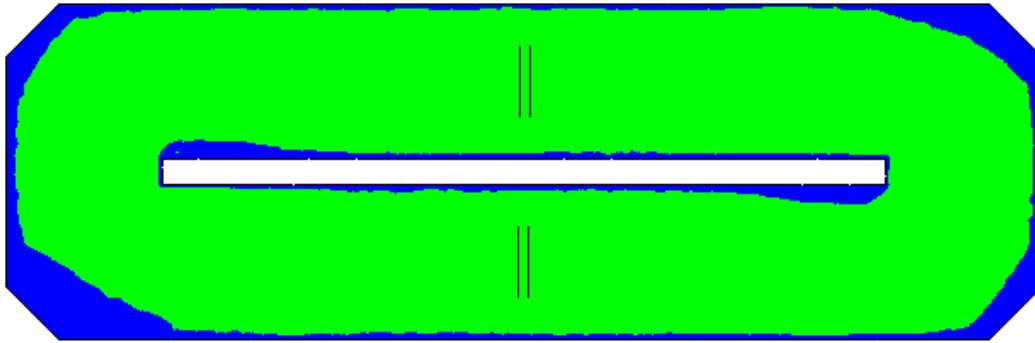


Figura 77: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW

De todas las alternativas estudiadas probablemente ésta sea la óptima, ya que se consigue una buena agitación en todo el tanque salvo alguna pequeña zona en las esquinas (similar al caso de dos agitadores de 6,41kW); sin embargo el consumo en este caso es mucho menor.

Una de las recomendaciones de los fabricantes es no colocar los agitadores cerca de los giros en este tipo de tanques de recirculación, ya que de ese modo el agitador no consigue succionar correctamente el flujo. En la siguiente figura se muestra esta situación:

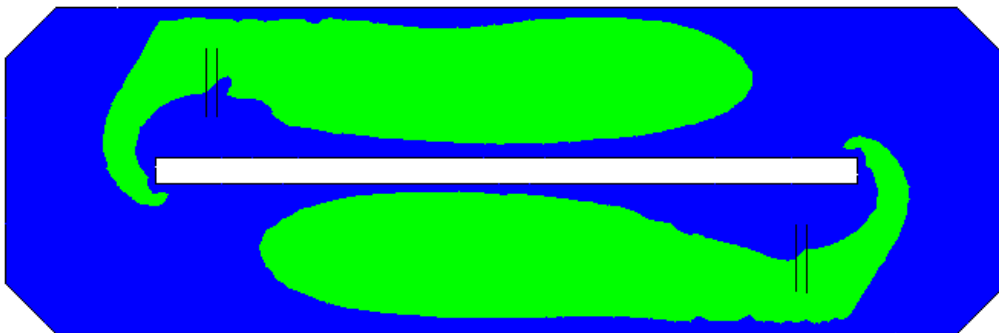


Figura 78: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW

Los dos agitadores tienen la misma potencia que los agitadores de la figura 77, sin embargo, se puede observar cómo el nivel de agitación que se consigue con esta nueva disposición es muy inferior al que se conseguía colocando los agitadores lejos de los giros.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para el tanque de recirculación:

Tanque de recirculación	
Dimensiones	40m x 13m x 6,5m
Agitadores instalados	2 de 2,54kW
Potencia total	5,08kW
Potencia/volumen	1,61W/m ³

Tabla 17: Resumen optimización tanque de recirculación

6.4.3. Tanque anular

En este caso se trata de una piscina anular que tiene un diámetro exterior de 30 metros, un diámetro interior de 15 metros y una profundidad de 6,5 metros. En este tipo de tanques el fluido es empujado por los agitadores y está dando vueltas continuamente, igual que sucede en los tanques de recirculación.

En primer lugar, se utiliza la configuración recomendada por el fabricante para este tipo de aplicación, utilizando dos agitadores de 2500mm de diámetro girando a 46rpm cuya potencia es de 6,41kW cada uno. En la siguiente figura se muestra esta situación:

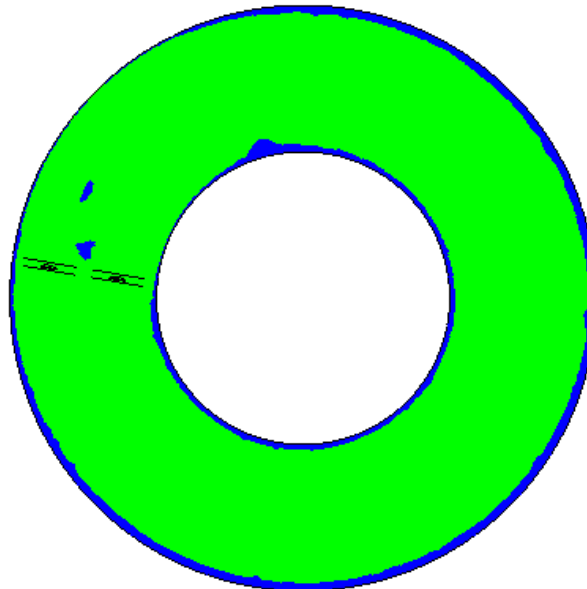


Figura 79: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 6,41kW

Se observa en la imagen anterior que con dos agitadores de 6,41kW se consigue una agitación adecuada en todo el tanque, por lo que ésta podría ser una buena alternativa.

A continuación se estudiará el resultado que se obtendría utilizando también dos agitadores pero de menor potencia, para ver si es posible conseguir una buena

agitación en toda la piscina consumiendo menos energía.

Para ello, en la siguiente figura se muestra el nivel de agitación que se conseguiría con dos agitadores de 2500mm que giran a 27rpm, cuya potencia es de 1,27kW cada uno.

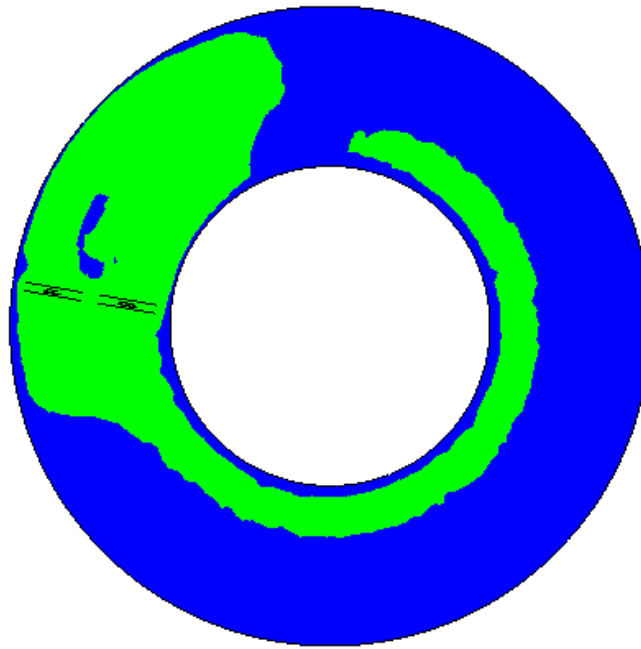


Figura 80: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 1,27kW

Se observa cómo al cambiar los agitadores de 6,41kW por los de 1,27kW, el nivel de agitación que se consigue en el tanque baja drásticamente. Queda claro que con dos agitadores de 1,27kW no es suficiente para conseguir la agitación deseada en un tanque anular de estas dimensiones.

Por último se probará a utilizar una disposición intermedia a los dos casos anteriores, utilizando dos agitadores del mismo tamaño, girando a una velocidad de 34rpm, cuya potencia es de 2,54kW. En la siguiente figura se muestra esta disposición:

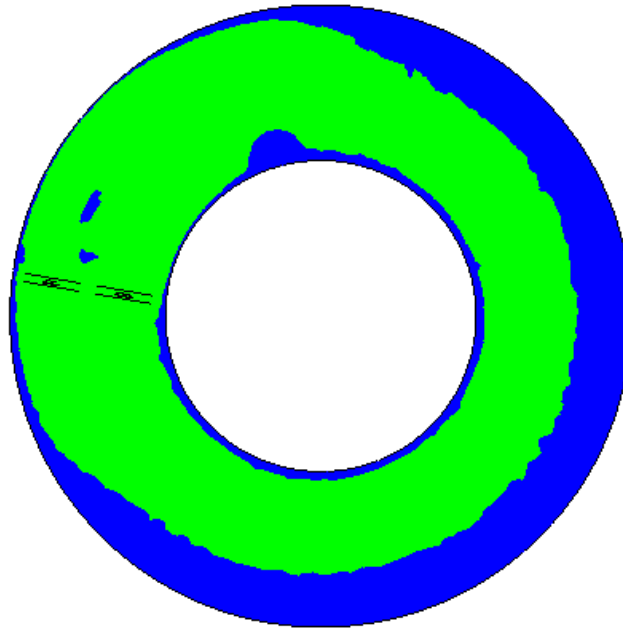


Figura 81: Velocidad en el fondo del tanque con dos agitadores de 2,54kW

Se observa en la figura cómo se consigue una clara mejoría en la agitación respecto a la configuración de dos agitadores de 1,27kW, sin embargo no se consigue agitar correctamente toda la piscina, ya que aunque la mayor parte está bien agitada, sigue habiendo un volumen considerable que no cumple los requisitos.

Teniendo en cuenta los resultados que se han obtenido, lo más razonable sería utilizar dos agitadores de 6,41kW ya que es con los únicos que se consigue una correcta agitación en todo el tanque.

En la siguiente figura se muestra la distribución de velocidades y la dirección del flujo para la disposición óptima seleccionada.

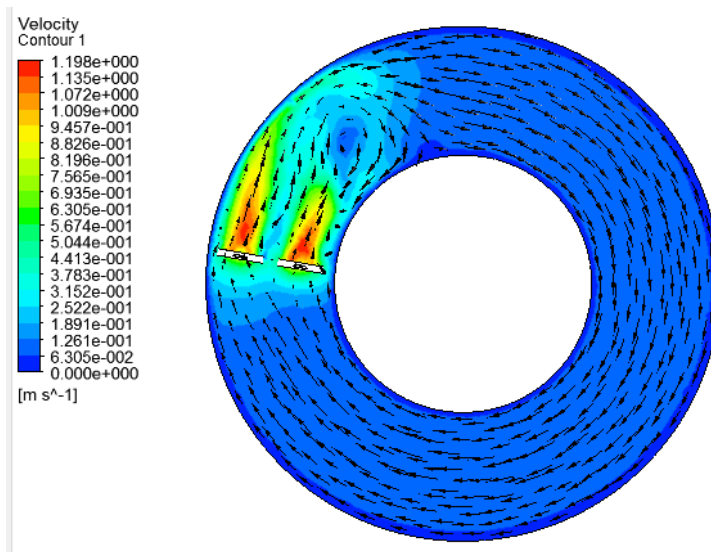


Figura 82: Distribución de velocidades en piscina anular

En la tabla se resumen los resultados obtenidos para el tanque anular:

Tanque de recirculación	
Dimensiones	Dext = 30m, Dint = 15m, h=6,5m
Agitadores instalados	2 de 6,41kW
Potencia total	12,82kW
Potencia/volumen	3,72W/m ³

Tabla 18: Resumen optimización tanque anular

Comparando las tres tablas resumen, se puede observar cómo para la solución adoptada utilizando agitadores de 1,27kW (tanque rectangular) la relación potencia/volumen es muy inferior a la que se obtiene para la solución que implementa agitadores de 6,41kW (tanque anular). Esto es lógico, ya que como hemos visto anteriormente, para menores velocidades de giro la eficiencia aumenta y el agitador de 1,27kW gira a 27rpm mientras que el de 6,41kW gira a 46rpm.

Por lo tanto, se puede concluir que la solución con menos consumo energético posible para cada caso correspondería a una solución mediante agitadores de 1,27kW. Sin embargo, esto aumentaría el número de agitadores necesarios en muchos casos y, por tanto, también aumentaría la inversión necesaria para implementarlos.

7. Estudio de viabilidad económica

Es este apartado se va a realizar un pequeño estudio que permita comprobar la rentabilidad de utilizar este tipo de equipos dentro de una EDAR.

Para realizar el estudio, se ha tomado como base para los cálculos el volumen de los reactores de la EDAR de Almassora. Esta EDAR dispone de las siguientes ubicaciones donde se podrían instalar agitadores sumergibles:

- Dos reactores biológicos de 2000m^3 cada uno para el tratamiento de agua industrial.
- Un reactor biológico de 3000m^3 para el tratamiento de agua urbana.
- Un digestor anaerobio de 4600m^3 para el tratamiento de fangos.

Para el caso de los reactores biológicos, es muy habitual que sean del tipo de tanques de recirculación con aireación como el que se ha trabajado en el apartado anterior de optimización. El tanque de recirculación del apartado anterior tiene un volumen de 3140m^3 , por lo que es prácticamente el mismo volumen que el reactor biológico para tratamiento de agua urbana de esta EDAR. De este modo, para este caso la solución más óptima que se ha alcanzado es utilizar dos agitadores de $2,54\text{kW}$ cada uno.

Para los reactores de 2000m^3 , se puede buscar una solución proporcional. Considerando que para el de 3000m^3 el empuje total de los agitadores es de 4328N , se puede deducir que para este caso el empuje necesario sería de alrededor de 2885N . De los agitadores que hemos estudiado, la opción óptima es utilizar 3 agitadores de $1,27\text{kW}$. Tal vez con dos agitadores de este tipo sería suficiente, aunque no se alcancen los 2885N de empuje.

Para el digestor anaerobio se considerará un tanque rectangular. En este caso, teniendo en cuenta que el tanque rectangular analizado anteriormente tiene un volumen de 2250m^3 y se consigue agitar correctamente con dos agitadores de $1,27\text{kW}$, para este caso cuyo tamaño es ligeramente superior al doble, se podría optar por utilizar dos agitadores de $6,41\text{kW}$ cuyo empuje es aproximadamente tres veces superior.

Coste con agitadores sumergibles de baja velocidad

- Dos reactores biológicos de 2000m^3 (tres agitadores de $1,27\text{ kW}$)

Potencia consumida = $1,27\text{ kW} \times 3\text{ agitadores} \times 2\text{ reactores} = 7,62\text{ kW}$

Empuje = $1343\text{N} \times 3\text{ agitadores} \times 2\text{ reactores} = 8058\text{ N}$

Eficiencia = 1057 N/kW

- Reactor biológico de 3000m^3 (dos agitadores de 2,54 kW)

Potencia consumida = $2,54\text{ kW} \times 2\text{ agitadores} = 5,08\text{ kW}$

Empuje = $2164\text{ N} \times 2\text{ agitadores} = 4328\text{ N}$

Eficiencia = 852 N/kW

- Digestor anaerobio de 4600m^3 (dos agitadores de 6,41 kW)

Potencia consumida = $6,41\text{ kW} \times 2\text{ agitadores} = 12,82\text{ kW}$.

Empuje = $4073\text{ N} \times 2\text{ agitadores} = 8146\text{ N}$

Eficiencia = 635 N/kW

Potencia total = $25,52\text{ kW}$

Para comparar los costes energéticos con la solución propuesta anteriormente, se utilizará como referencia la eficiencia que tienen los equipos de agitación que hay instalados actualmente en muchos de estos tanques. Estos equipos son o bien agitadores verticales o agitadores sumergibles más compactos. Estos equipos tienen una eficiencia en términos de ratio empuje-potencia que no suele superar los 300 N/kW , por lo que se tomará este valor para repetir los cálculos anteriores y luego poder calcular el ahorro energético que se conseguiría utilizando agitadores sumergibles de baja velocidad.

Coste con agitadores sumergibles compactos

- Dos reactores biológicos de 2000m^3

Empuje necesario = 5770 N

Eficiencia = 300 N/kW

Potencia consumida = $19,23\text{ kW}$

- Reactor biológico de 3000m^3

Empuje necesario = 4328 N

Eficiencia = 300 N/kW

Potencia consumida = $14,43\text{ kW}$

- Digestor anaerobio de 4600m^3

Empuje necesario = 8146 N

Eficiencia = 300 N/kW

Potencia consumida = 27,15 kW

Potencia total = 60,81 kW

- **Ahorro energético**

Ahorro energético = $(60,81 - 25,52) \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ días} = 309140 \text{ kWh/año}$

Considerando un coste del kWh de 0,08€ el ahorro en términos económicos sería el siguiente:

Ahorro económico = $309140 \text{ kWh/año} \times 0,08 \text{ €/kWh} = 24731 \text{ €/año}$

- **Coste de la inversión**

Este trabajo se ha realizado analizando el comportamiento de un agitador sumergible de baja velocidad de la empresa KSB, en concreto el modelo Amaprop. Tanto en la sección de optimización como en los cálculos anteriores de consumo energético, los agitadores utilizados tienen un diámetro de 2500mm. Este modelo, el Amaprop 2500, tiene un coste de 12000€.

Teniendo en cuenta que para la propuesta anterior serían necesarios 7 agitadores de este tipo, la inversión necesaria sería de 84000€.

Esto da como resultado un periodo de retorno de la inversión de 3,4 años.

8. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el funcionamiento de los agitadores sumergibles de baja velocidad con el objetivo de entender su comportamiento y a partir de ahí poder llevar a cabo un trabajo de optimización con el fin de hallar la solución más eficiente energéticamente para las aplicaciones que tienen este tipo de agitadores dentro de una EDAR. A continuación, se presentan las principales conclusiones a las que se ha llegado a través del análisis de resultados y optimización realizada:

- En primer lugar, se ha estudiado la estructura del flujo generado por el agitador, observando que se acelera el fluido desde la zona de succión hacia la zona de impulsión, generando un flujo axial. A partir de ahí, el flujo se va ensanchando progresivamente a medida que avanza y va arrastrando el fluido que le rodea, de forma que el caudal del flujo va aumentando y la velocidad reduciéndose.
- Se ha estudiado cual es la influencia del diámetro de los álabes y de la velocidad de giro sobre el empuje que genera el agitador, siendo el empuje el parámetro que describe el comportamiento del agitador, ya que nos indica la fuerza que es capaz de transferir sobre el flujo. Mediante el análisis de los resultados se ha comprobado que tanto al aumentar el diámetro como al aumentar la velocidad de giro, el empuje del agitador aumenta.
- La eficiencia y el empuje son las dos características más importantes de un agitador sumergible de baja velocidad, ya que precisamente lo que se busca es realizar la agitación con el menor consumo energético posible. De este modo, se ha estudiado como afectan las variables anteriores a la eficiencia del agitador, calculando esta eficiencia en términos de ratio empuje-potencia. Se ha podido comprobar que la eficiencia aumenta al aumentar el diámetro del agitador y disminuye al aumentar la velocidad de giro. Para los agitadores de mayor tamaño (2500mm para el modelo Amaprop) se han obtenido eficiencias que van desde 635N/kW hasta la máxima de 1057N/kW. Teniendo en cuenta que la eficiencia de otro tipo de agitadores más compactos no suele superar los 300N/kW, se observa que la diferencia en la eficiencia es realmente importante.
- Se ha desarrollado una ecuación que replica el comportamiento de este tipo de agitador sumergible. Con esta ecuación se han podido simplificar las simulaciones realizadas en la parte de optimización, de modo que el tiempo de cálculo se ha visto considerablemente reducido.

- Se ha tratado de optimizar el proceso de agitación en aquellas situaciones en las que se utiliza un sistema de agitación dentro de una EDAR (en el reactor biológico y en el digestor anaerobio). Se ha comprobado que del posicionamiento del agitador depende en gran medida el nivel de agitación que se consigue y se han simulado distintas situaciones con agitadores de distintas potencias para encontrar la situación que permita una correcta agitación con el menor consumo energético.
- Por último, se ha realizado un pequeño estudio de viabilidad en el que se ha calculado el ahorro energético que se conseguiría si se reemplazara un sistema de agitación mediante equipos compactos por otro con agitadores sumergibles de baja velocidad. Los cálculos se han realizado para un tamaño de reactores como los que hay en la EDAR de Almassora, obteniendo un ahorro de 309140 kWh/año, lo que suponen 24731 €/año. Se ha calculado que la inversión necesaria sería de unos 84000€ y que el retorno de la inversión se conseguiría en aproximadamente tres años y medio.

Con todo lo visto anteriormente podemos decir que los agitadores sumergibles de baja velocidad son una alternativa con la que se consigue ahorrar más de la mitad de la energía en la agitación de tanques con respecto al resto de tipos de agitadores. Teniendo en cuenta el ahorro económico en términos de energía eléctrica que se consigue y la inversión necesaria, se puede decir que se trata de una inversión viable, especialmente si los equipos de agitación han consumido gran parte de su vida útil y conviene renovarlos pronto.

9. Bibliografía

1. Miliarium. [En línea]
<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Aguas/ProcesosEDAR.asp>.
2. Wikipedia. [En línea] https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_sludge.
3. iAgua. [En línea] <https://www.iagua.es/noticias/isotrol/14/11/17/eficiencia-energetica-estaciones-depuradoras-aguas-residuales>.
4. **Castell, David, y otros, y otros.** *Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías.* 2011.
5. **IDAE.** *Estudio de prospectiva. Consumo Energético en el sector del agua.* 2010.
6. **M.G. González González, A. Melián Navarro, J.M. Molina-Martínez y A. Ruiz-Canales.** *Medidas de ahorro y eficiencia energética de carácter innovador en estaciones depuradoras de aguas residuales.*
7. *Development of a turbulent jet generated by a mixer in weak co-flow and counter-flow.* **Per Petersson, Magnus Larson, Lennart Jönsson.** 2000, International Journal of Heat and Fluid Flow, pág. 4.
8. *A case for mixer thrust.* **Uby, Lars.** University College of London : s.n., 2001. IChemE FMPSG seminar. pág. 4.
9. **S & C Thermofluids Ltd.** S & C Thermofluids Ltd. [En línea]
<http://www.thermofluids.co.uk/effect.php>.
10. *ISO 21630:2007.*
11. **Wilo.** *Sewage Technology for Water Management.* 2013.
12. **Pumps, Faggiolati.** Mixer Test ISO 21630. [En línea]
http://www.faggiolatipumps.it/rassegna_stampa/MIXER_NEW_TESTING_SYSTEM_FAGGIOLATI.pdf.
13. **Farrás, Luis E. Pérez.** TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN. [En línea] Agosto de 2005.
http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoria_sedimentacion.pdf.
14. **Osses, Juan.** ESSS. [En línea] <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/12/el-metodo-de-volumenes-finitos/>.
15. ANSYS: Licensing and Terms of Use. [En línea] <http://www.ansys.com/es-ES/products/academic/licensing-and-terms-of-use>.

16. *Development of a turbulent jet generated by a mixer in weak co-flow and counter-flow.* **Per Petersson, Magnus Larson, Lennart Jönsson.** 2000, International Journal of Heat and Fluid Flow, págs. 7-8.

17. **Universidad Carlos III de Madrid.** INTRODUCCION AL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS:. [En línea] http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf.

18. **Fei, T., Weidong, S., Qihua, Z., Hua, J., Desheng, Z.** *The characteristics of two-blade Submersible Mixers' flow field inner the pool.* 2013.

19. **College, Dartmouth.** Swirling flows. [En línea] <https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs250/Swirling-flows.pdf>.